

# HUMANIDADES, CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN EN PUEBLA

ACADEMIA JOURNALS



OPUS PRO SCIENTIA ET STUDIUM

ISSN 2644-0903 online

VOL. 2, NO. 1, 2020

[WWW.ACADEMIAJOURNALS.COM](http://WWW.ACADEMIAJOURNALS.COM)

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN AUSPICIADO POR EL CONVENIO CONCYTEP-ACADEMIA JOURNALS



DIANA BERENICE MARTÍNEZ TERAN

DISPOSITIVO PARA MONITOREO DE VIBRACIÓN MECÁNICA INDUSTRIAL MEDIANTE IMPRESIÓN  
3D

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

ASESORES: DR. JAVIER FLORES MÉNDEZ  
M.C. MANUEL APARICIO RAZO

NÚMERO DE SECUENCIA 2-1



Dispositivo para monitoreo de vibración  
mecánica industrial mediante impresión  
3D

BENEMÉRITA  
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA  
DE PUEBLA

FACULTAD DE CIENCIAS  
DE LA ELECTRÓNICA

Autor: C. Diana Berenice  
Martínez Terán

Asesores: Dr. Javier Flores Méndez  
M.C. Manuel Aparicio Razo

Fecha de aprobación: 30/10/2019

# **Diana Berenice Martínez Teran<sup>1†</sup>, Javier Flores Méndez<sup>1, 2</sup>, Manuel Aparicio Razo<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Benemérita Universidad Autónoma de Puebla-Ciudad Universitaria , Blvd. Valsequillo y Esquina, Av. San Claudio s/n, Col. San Manuel, C.P. 72570, Puebla, Pue, México.

<sup>2</sup>Tecnológico Nacional de México/ I.T. Puebla, Av. Tecnológico No. 420, Maravillas, C.P. 72220, Puebla, Pue, México.

## **Resumen**

*La industria manufacturera a nivel internacional tiene una alta dependencia de las máquinas dinámicas, lo que implica directamente que estas están sometidas a vibraciones mecánicas, y las variaciones de estas son indicadores de fallas en las mismas, que son empleadas para determinar las condiciones de trabajo de las máquinas y determinar cuando es conveniente establecer un programa de mantenimiento.*

*México se está industrializando de forma rápida y hoy es una de las economías manufactureras más importantes del mundo, así Puebla cuenta con un número elevado de industrias, lo que requiere de servicios de monitoreo de las condiciones de trabajo de las máquinas industriales, que generan costos elevados y necesitan de personal altamente capacitado en el área de vibraciones mecánicas.*

*Este trabajo consiste en usar un fenómeno de física para el diseño y validación de un prototipo para medición de vibraciones mecánicas con el que se determinan las condiciones de trabajo de las máquinas industriales de forma visual a bajo costo mediante voladizos flexibles de impresión 3D.*

## **Palabras clave**

*Frecuencia, Vibración, Mantenimiento Industria, Física.*

## **Abstract**

*At international level the manufacturing industry has a high dependence on dynamic machines, which directly implies that these are submitted to mechanical vibrations, and the variations of these are indicators of failures in them, which are used to determine the working conditions of the machines and determine when it is convenient to establish a maintenance program.*

*Mexico is rapidly becoming industrialized and today it is one of the most important manufacturing economies in the world, so Puebla has a high number of industries, which requires services to monitor the working conditions of industrial machines, wich generate high costs and need highly trained staff in the area of mechanical vibrations.*

*This work consists of using a physics phenomenon for the design and validation of a prototype for measuring mechanical vibrations with which the working conditions of industrial machines are determined visually at low cost by flexible 3D printing beams.*

## **Key words**

*Frequency, Vibration, Industrial maintenance, Physics.*

## **I. Introducción**

El sector industrial a nivel mundial provee de gran porcentaje del Producto Interno Bruto (PIB), el cual expresa el valor monetario de bienes y servicios y es una medida de la competitividad de las industrias. Para que una industria se mantenga con un nivel alto de competitividad requiere de inversión en el mantenimiento de la maquinaria, lo que genera costos elevados.

México se está industrializando en materia del sector manufacturero y cuenta con uno de los mercados más grandes en este rubro, así el estado de Puebla aporta un 3.4% del PIB nacional y cuenta con 19 parques industriales, los sectores estratégicos del estado incluyen a la industria automotriz y la metal-mecánica.

Gran parte de la maquinaria empleada es de tipo rotativo, y está sometida a vibraciones mecánicas mediante las cuales se puede realizar un análisis para determinar la condición de trabajo de una máquina. El mantenimiento industrial consiste en conservar el nivel óptimo de trabajo de las máquinas, y es un procedimiento necesario en todas las industrias. Debido a esto, existen elevados egresos y requiere de personal con un alto nivel de conocimiento en el área de las vibraciones mecánicas.

## **II. Objetivo general**

Proponer un sistema de monitoreo visual de vibraciones mecánicas por medio de voladizos flexibles de impresión 3D.

### **Objetivo específico**

- 1.- Diseñar y validar de forma teórica y experimental un prototipo de monitoreo a partir de voladizos flexibles mediante impresión 3D.
- 2.- Adaptar el prototipo como herramienta para el diagnóstico de las condiciones de trabajo de las máquinas industriales a bajo costo.

## **III. Problemática e hipótesis**

La industria a nivel global tiene una alta dependencia de las máquinas dinámicas de características rotativas. Estas máquinas presentan en su totalidad diferentes niveles de vibración mecánica debido a la interacción entre sus componentes móviles. Las variaciones de vibración mecánica son indicadores potenciales de fallas que alteran la eficiencia de la máquina.

Todas las empresas tienen altos egresos en programas de mantenimiento, y estos costos están definidos de acuerdo con el tipo de máquina y la función que esta desempeña dentro del proceso productivo. Lamentablemente el mantenimiento es un tema prioritario.

Este trabajo consiste en utilizar uno de los fenómenos de la física para desarrollar un dispositivo de monitoreo de vibraciones mecánicas que se pueda aplicar a nivel industrial a bajo costo. Por otra parte, se plantea diseñar y validar de forma teórica y experimental dicho dispositivo con el fin de crear una herramienta para el diagnóstico de las condiciones de trabajo de las máquinas industriales sin necesidad de contar con personal capacitado en el área de vibraciones mecánicas.

#### IV. Marco teórico

##### Monitoreo y diagnóstico de la condición de una máquina

Todas las máquinas presentan ciertos niveles de vibración, aunque se encuentren operando correctamente, sin embargo, cuando se presenta alguna anomalía, estos niveles normales de vibración se ven alterados indicando la necesidad de una revisión del equipo. Cada uno de los elementos que componen a la maquinaria posee características que los identifican en cuanto a diseño y velocidad de operación, de aquí que cada uno de ellos vibre a frecuencias características <sup>[1]</sup>.

##### Fallas comunes de vibraciones en maquinarias

- Desbalance.
- Desalineamiento.
- Resonancia.
- Soltura mecánica.
- Engranajes.
- Rodamientos.
- Bandas.
- Problemas eléctricos <sup>[2]</sup>.

Las frecuencias de vibración se pueden relacionar con el problema específico, y la amplitud implica la severidad del problema <sup>[3]</sup>.

##### Variables para medir vibración

Existen varias variables para medir la amplitud de vibración de un espectro <sup>[4]</sup>.

En la Tabla 1 se muestran las variables comunes en que se miden las vibraciones mecánicas, que ayudan a determinar diferentes problemáticas en función de los rangos de frecuencia.

Variable	Frecuencia	Reconocimiento de patrones
Desplazamiento	Baja	Chumaceras.
Velocidad	Baja y media	Desbalanceo, desalineación, etc.
Aceleración	Alta	Fricciones abrasivas, problemas en engranajes

Tabla 1. Variables para medir vibración y resultados.

## Técnicas predictivas principales en las industrias

El mantenimiento predictivo consta de una serie de ensayos de carácter no destructivo orientados a realizar un seguimiento del funcionamiento de los equipos. Obtenida la información necesaria y detectada la avería, puede programarse de manera oportuna el mantenimiento correctivo, evitando tener un mayor impacto en los procesos de producción y prolongando la vida útil de las máquinas a través de este tipo de mantenimiento <sup>[5]</sup>.

### Tipos de mantenimiento

- *Mantenimiento correctivo*. Tiene como objetivo restaurar la máquina a las condiciones iniciales operativas, por medio de la reparación o cambio de componentes, las cuales pudieron fallar por un desgaste, daño o rotura.
- *Mantenimiento preventivo*. Tiene como objetivo prevenir fallas, utilizando actividades planificadas en cuanto a inspección, para mantener los equipos bajo condiciones específicas de operación <sup>[5]</sup>.
- *Mantenimiento predictivo*. Consiste en el seguimiento organizado con medición periódica o continua y su comparación con patrones preestablecidos, para la determinación del instante en que se debe producir la intervención de mantenimiento, justo antes de que la máquina falle, con el fin de corregir a tiempo y evitar el tiempo muerto del equipo y la producción y maximizar el tiempo de vida de los componentes.

### Desventajas del mantenimiento predictivo

- Limitaciones a la hora de elegir la instrumentación de medida y diagnóstico.
- Mayores inversiones iniciales en la compra de equipos de medición y en capacitación de personal.
- Necesidad de un nivel de formación para los técnicos de mantenimiento, pues deben estar familiarizados con el manejo de equipos de alto nivel tecnológico y conocer a profundidad el funcionamiento de las máquinas <sup>[5]</sup>.

### Ventajas del mantenimiento predictivo

- Se puede determinar de manera óptima el tiempo para realizarlo.
- Mejora de la gestión de inventario de repuestos y reducción al mínimo de las emergencias correctivas.
- Su ejecución puede realizarse sin interrumpir ni alterar el funcionamiento normal de instalaciones y equipos.
- Mejora las condiciones de seguridad en la planta. Reduce la probabilidad de un paro catastrófico.
- Incrementos de productividad del 2% al 10%.
- Gastos reducidos para refacciones y mano de obra. La reparación de una máquina con una falla en servicio costará diez veces lo que cuesta una reparación anticipada y programada <sup>[6]</sup>.
- Aumento en eficiencia y productividad global.
- Aumento de la rentabilidad de la maquinaria.

El mantenimiento predictivo es el ideal para ser ejecutado en las industrias, ya que reduce los costos y predice las fallas en las máquinas, con esto se tiene un control de cuando es necesario hacer reparaciones y evitar tiempos perdidos de producción.

### **Pasos para la aplicación del mantenimiento predictivo basado en el análisis de vibraciones mecánicas**

1. Obtener información de la máquina.
  - a. Información referencial a los niveles de vibración característicos de la maquina proporcionada por el fabricante.
  - b. Historial de mantenimiento; datos sobre causas de averías, fallos comunes, información relevante acerca de ruidos comunes o vibraciones.
  - c. Datos técnicos específicos: velocidad de operación (r.p.m.), potencia, cojinetes, diámetros de poleas, etc <sup>[7]</sup>.
2. De cada máquina se requiere definir los siguientes aspectos:
  - a. Puntos y direcciones de mediciones.
  - b. Magnitud a medir (posición, velocidad, aceleración).
  - c. Tipo de sensor o aparato que se va a utilizar en la medición.
3. Definición del intervalo de frecuencia de medición <sup>[8]</sup>.

Para realizar las mediciones de vibración se utilizan aparatos especializados que tienen un costo de entre \$50,000 MXN y \$200,00 MXN. Las empresas contratan los servicios de personas expertas en el área para conocer las amplitudes de vibración de la maquinaria y determinar si estas tienen alguna falla.

### **V. Diseño y validación del prototipo**

El prototipo consta del diseño de un resonador armónico, el cual está compuesto por vigas, las cuales tienen una longitud específica lo que determina su frecuencia natural de vibración, así se puede comprobar de manera visual la frecuencia de vibración de algún sistema.

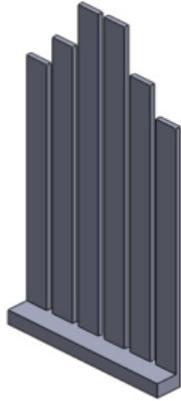


Figura 1 Diseño en SolidWorks® del resonador

El principio físico empleado para determinar la frecuencia natural de vibración de una viga es la resonancia, esta se presenta cuando la frecuencia de una fuerza externa se iguala con la frecuencia natural de un objeto o sistema.

Para el diseño del prototipo, se eligieron tres frecuencias para las cuales se calculó la longitud de la viga correspondiente, se asignó el material flexible ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno) y para su fabricación se recurrió a la tecnología de impresión 3D.

Teóricamente la frecuencia natural de un voladizo flexible puede calcularse mediante [9]:

$$f_n = \frac{k_n}{2\pi} \sqrt{\frac{EIg}{wl^4}}$$

$f_n$  es la frecuencia natural en Hertz  
 $k_n$  es el factor de modo de vibración del voladizo flexible  
 $E$  es el módulo de Young del material en Pascales  
 $g$  es la gravedad medida en  $m/s^2$   
 $I$  es el momento de inercia de área de la sección transversal en  $m^4$  es la longitud de la viga en metros

$$I = \frac{bh^3}{12}$$

$h$  es la altura de la sección transversal en metros  
 $b$  es el ancho de la sección transversal en metros  
 $\delta$  es la densidad de masa del material del voladizo en  $Kg/m^3$   
 $w$  es la carga por unidad de longitud

Los factores de modos de vibración de una viga se muestran en la tabla 2.

Modo	$k_n$
1	3.52
2	22.0
3	61.7
4	121.0
5	200.0

Tabla 2. Modos y factores de vibración de una viga.

El polímero ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno) tiene las características de interés que se muestran en la tabla 3.

Parámetro	Valor
Densidad $\delta$	1060Kg /m <sup>3</sup>
Módulo de Young E	2275 (MPa)

Tabla 3. Características del polímero ABS.

Se eligió una sección transversal rectangular de las siguientes dimensiones:

$$b * h = 7 \text{ mm} * 1.51 \text{ mm}$$

Se empleó el primer modo de vibración para voladizos flexibles:

$$k_n = 3.52$$

Con la fórmula siguiente se puede calcular la longitud de una viga para una frecuencia determinada.

$$l = \sqrt[4]{\frac{EIgk_n^2}{4\pi f_n^2 w}}$$

En la tabla 4 se muestran las frecuencias elegidas y la longitud de viga correspondiente calculada.

Frecuencia (Hz)	Longitud (mm)
27	115
37	98
47	87

Tabla 4. Frecuencias y longitudes de vigas.

## VI. Resultados

En la figura 1 se puede observar el diseño del prototipo realizado en SolidWorks®, en el que las longitudes de las barras son las mostradas en la tabla 2.

Al someter el diseño a un análisis de elemento finito en la modalidad de frecuencias, se observa que las barras vibran a las frecuencias elegidas.

En las figuras 2, 3 y 4 se puede observar cómo oscila cada una de las barras correspondientes a las longitudes de 115 mm, 98 mm y 97 mm con frecuencias de resonancia de 27,37 y 47 Hz respectivamente.

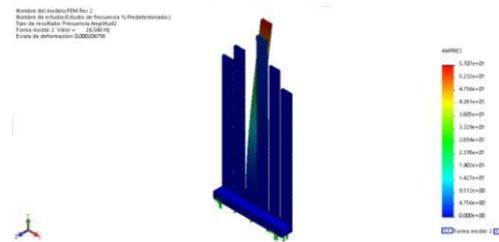


Figura 2 Frecuencia de resonancia a 27 Hz.

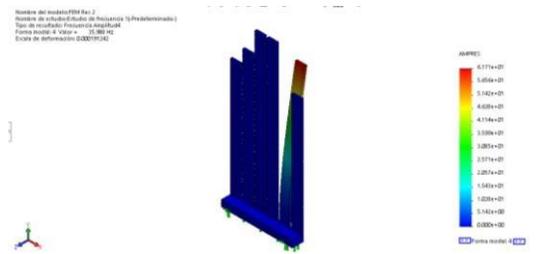


Figura 3 Frecuencia de resonancia a 37 Hz.

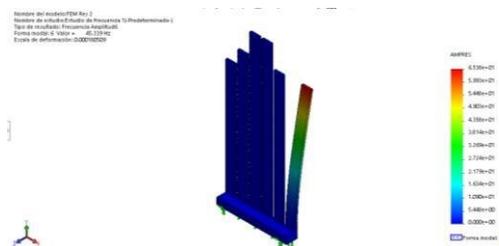


Figura 4 Frecuencia de resonancia a 47 Hz.

## Demostración experimental

Para la demostración experimental se hizo uso de un dispositivo que varía su frecuencia de trabajo al accionar un botón (caladora de madera), para la cual se fabricaron dos resonadores mediante impresión 3D del polímero ABS, como los mostrados en la figura 1 y se pegaron sobre su estructura, asimismo, el dispositivo se colocó sobre una base para fijarla como se muestra en la figura 5.



Figura 4 Resonadores colocados sobre la caladora.



Figura 5 Medidor de espectros de vibración COMTEST vb8.

Para determinar la frecuencia menor de trabajo del dispositivo se hizo empleó un instrumento de medición de vibraciones COMTEST VB8 que puede verse en la figura 6. Se realizó la medición al accionar el botón del dispositivo (figura 7) y el aparato mostró la gráfica de la figura 8.



Figura 7 Medición del espectro de vibración de la caladora.

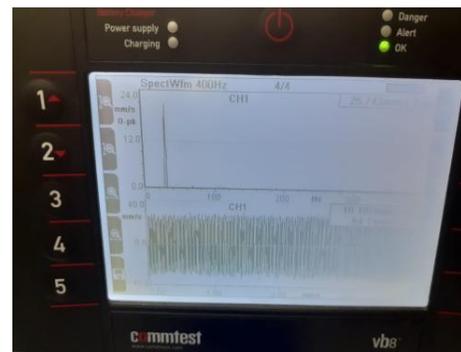


Figura 8 Frecuencia coincidente con 27 Hz.

Como se puede observar en la figura 8 la frecuencia menor de trabajo de la caladora es coincidente con la frecuencia de diseño mínima de 27 Hz, por lo cual es útil para validar el funcionamiento del resonador.

Cada viga del resonador vibrará conforme a la frecuencia de vibración de la fuerza externa, las vigas vibran de forma independiente entre ellas, con esto se puede visualizar el fenómeno de manera muy simple.

Por medio de este resonador basado en voladizos flexibles se puede tener un rango de vibración bastante amplio que oscila entre 1 Hz a 1 MHz, esto es posible gracias al factor de modo de vibración del voladizo flexible.

## VII. Impacto

Actualmente, con el constante desarrollo que han tenido industrias como la automotriz, aeroespacial, energía, minería, moldes, médica, electrodomésticos y manufactura en México, la importancia de las máquinas-herramienta se ha vuelto un tema muy importante.

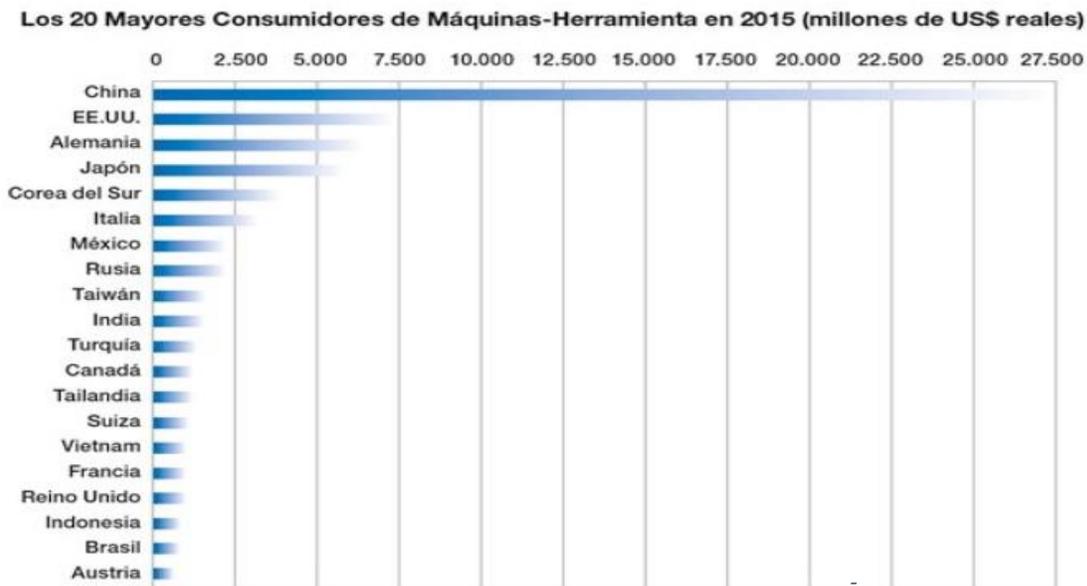
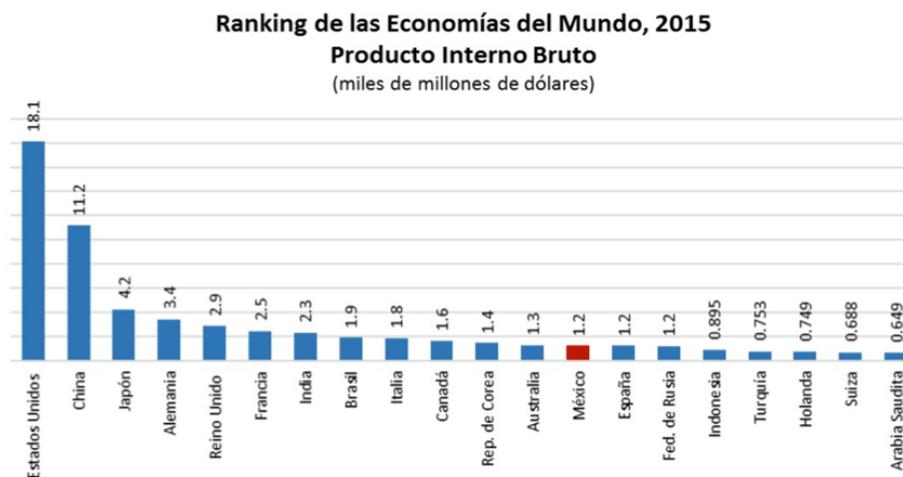


Figura 9 Los 20 países mayores consumidores de máquinas-herramienta en 2015 (millones de US\$ reales)

Ramón Brambilia, presidente de la Asociación Mexicana de Distribuidores de Maquinaria (AMDM), señala que México se está industrializando de forma consistente y está tomando un lugar destacado en el grupo de países líderes manufactureros. En el país la importación de equipos ha venido incrementándose de manera importante, logrando que las empresas nacionales tengan acceso a máquinas-herramienta de última generación. De acuerdo con información de Hannover Fairs México, subsidiaria de Deutsche Messe AG, México es el sexto mercado de máquinas-herramienta más grande del mundo. Cabe mencionar que México importa máquinas-herramienta, principalmente de Estados Unidos, Japón, Alemania, China y España. Para mantenerse competitivo y entregar de manera confiable un producto de calidad, una empresa debe garantizar el funcionamiento adecuado de sus equipos de fabricación. Por esta razón el mantenimiento predictivo es más que una tendencia actual para las empresas del sector industrial <sup>[10]</sup>.



Fuente: Elaborado por el CEFP con datos del Fondo Monetario Internacional.

Figura 10 Ranking de las veinte economías del mundo

En la figura 9 se muestra la gráfica de los veinte países que más consumieron máquinas-herramienta en el año 2015 donde México se encuentra en el séptimo lugar.

En la actualidad estamos viviendo un cambio muy acelerado en los procesos industriales impulsado por los últimos avances en la tecnología. El mantenimiento predictivo forma parte de este proceso, en la medida en que se adapta perfectamente con los principios de anticipación, eficiencia y productividad de las fábricas <sup>[11]</sup>.

México es una de las economías manufactureras más importantes del mundo, esto se debe al desarrollo que ha tenido el sector a lo largo de siete décadas en la acumulación de capacidades productivas <sup>[11]</sup>.

Por otra parte, México se encuentra incluido dentro de las naciones con participación en estándares de alta tecnología, así como de exportaciones, además de que se clasifica también entre aquellos con alta productividad laboral, medida a través de la producción de Producto Interno Bruto (PIB) por trabajador. En materia de competitividad internacional uno de los parámetros a considerar es el tamaño de las economías basado en el PIB nominal de cada país <sup>[12, 13]</sup>.

En la figura 10 se observa el índice generado de PIB en 2015, donde en el ranking de las economías del mundo México se posiciona en el lugar 13.

El sector industrial en México, en términos de PIB, ha contribuido en promedio con el 33 por ciento del total del producto generado entre 1993 y 2015. Se considera también al sector agropecuario y al sector de servicios. El PIB manufacturero ha ejercido un papel determinante en el crecimiento y el desarrollo económico del país. Las manufacturas han participado en promedio desde 1993 a 2015 con 17.6 por ciento. Desde un enfoque estatal, Puebla contribuyó en el 2016 con el 3.4% del PIB y ocupó el lugar 10, con respecto al total nacional. Además, los sectores estratégicos en el estado de Puebla son: automotriz y autopartes, metalmecánica, química, plásticos, textil-confección e industria alimentaria. En el

rubro de infraestructura productiva, el estado de Puebla cuenta con 19 parques industriales y/o tecnológicos, los cuales son <sup>[14]</sup>:

- Área Industrial San Felipe Chachapa.
- Parque Industrial El Carmen.
- Conjunto Industrial Chachapa.
- Parque industrial Esperanza.
- Corredor Empresarial Cuautlancingo, A.C.
- Parque Industrial Tehueya.
- Fraccionamiento Industrial Resurrección.
- Parque Industrial Textil.
- Parque Industrial 5 de mayo.
- Parque Industrial Valle de Tehuacán.
- Parque Industrial Volkswagen, Fraccionadora Industrial del Norte, S.A. de C.V. (FINSA).
- FINSA, Puebla Industrial Park.
- Parque Industrial Puebla 2000.
- Centro de Innovación y Tecnología (CIT) del ITESM.
- Parque Industrial San Miguel, Corredor Industrial Quetzalcóatl.
- Instituto de Diseño e Innovación Tecnológica (IDIT) de la Universidad IBERO Puebla.
- Área Uno Corredor Industrial Quetzalcóatl.
- Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE).
- Parque Industrial San José Chiapa, AUDI.

Es necesario que las empresas inviertan en programas de mantenimiento para ser competitivas y proveer de productos de calidad a la población además de evitar retrasos y tiempos muertos en la producción cuando se presente alguna falla en la maquinaria. El mantenimiento predictivo es el ideal a ejecutarse en las industrias ya que predice las descomposturas y con esto se puede tener bajo control el momento en el que se requiera hacer una reparación; la desventaja principal es que se necesita de aparatos costosos y personal altamente capacitado.

Puebla, al contar con una cantidad considerable de parques industriales, implica que el número de industrias es elevado, con lo que todas estas recurren a hacer contrataciones de servicios de mantenimiento para trabajar en forma óptima sin interrupciones. Por ello, para dar una solución económica y fácil de implementar se usó uno de los fenómenos de la física para determinar el estado de una máquina de manera visual, mencionando que no necesita de capacitación alguna.

Con el diseño planteado es posible elegir cualquier frecuencia, de acuerdo con las necesidades de cada máquina, incluso se pueden elegir diversos rangos indicadores del estado de la máquina, teniendo en cuenta un rango para las condiciones normales, otro como señal de alarma, y otro para problemas en concreto, en el momento en el que se detecte que una viga que no corresponda a los parámetros normales de vibración está en resonancia se sabrá que es momento de una intervención. También se puede establecer un código de colores para cada rango de frecuencias, así se puede determinar de manera visual y más sencilla como está trabajando una máquina.

La tecnología de impresión 3D en la actualidad está tomando mucha relevancia y es una forma sencilla de reproducir un objeto realizado en un software de diseño. Tiene la

versatilidad de poder emplear diversos materiales para su fabricación, tener un bajo costo y manufacturarse de forma rápida.

### **VIII. Conclusiones**

El principio físico implementado en el dispositivo diseñado para el monitoreo de vibraciones mecánicas tiene un gran potencial para ser implementado en diversas industrias a nivel estatal y nacional, debido a que es un prototipo fácil de manufacturar, con un alto nivel de validación por simulación computacional y de manera experimental.

Por otra parte, actualmente nos encontramos en una faceta de alianza con la empresa SNOVA que se dedica a la impresión 3D para la manufactura de los dispositivos y poder implementarlos en las industrias de Puebla. La empresa SNOVA fue creada por talento joven en el estado.

Por último, consideramos que nuestro proyecto cumple con el fin de resolver un problema de la industria en el estado de Puebla, a través de los fenómenos físico-matemáticos de manera teórica y práctica con enfoque empresarial.

## IX. Referencias bibliográficas

1. Marín, Evelio Palomino. *Elementos de vibración y análisis de vibraciones en máquinas rotatorias*. [Documento] La Habana: Vibrosoft. Centro de Estudios de Ingeniería de Mantenimiento, 2007. 5 edición.
2. Olarte, William y Botero, Marcela. *Técnicas de mantenimiento predictivo utilizadas en la industria*. [Documento] Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira, 2010. 45.
3. Valencia, Víctor Edison Cabrera. *Estudio de un plan de mantenimiento predictivo para ventiladores industriales, aplicando la técnica de análisis de vibraciones*. [Documento] Guayaquil: s.n., 2018.
4. García, María del Rosario Prieto. *Trabajo de fin de grado en Ingeniería Aeroespacial, Vibraciones de Máquinas Rotativas; Análisis de Órdenes*. [Tesis] Sevilla: Departamento de Ingeniería Mecánica y Fabricación. Escuela Técnica Superior de Ingeniería, 2017.
5. Carvajal, Ramón Gabriel González. *Tesis de grado "Implementación del mantenimiento predictivo basado en el análisis de vibración en los compresores de tomillo de una empresa procesadora y enlatadora de productos del mar"*. [Tesis] Barcelona: Universidad de Oriente Núcleo de Anzoátegui, 2009.
6. Rao, Singiresu. *Vibraciones mecánicas*. México: PEARSON EDUCACIÓN, 2012. Quinta edición.
7. Carvajal. [En línea] Agosto de 2018. [Citado el: 16 de Octubre de 2019.] <https://es.calameo.com/read/003326301473770c7669b0>.
8. Mosquera, Genaro. *Las vibraciones mecánicas y su aplicación al mantenimiento predictivo*. [Documento] Caracas: Centro de Altos Estudios Gerenciales Instituto Superior de Investigación y Desarrollo, 2001.
9. Young, Warren C. y Richard, Budynas G. *Roark's Formulas for Stress and Strain*. s.l: McGrawHill, 2002. 7th edition.
10. Modern Machine Shop MÉXICO. *Modern Machine Shop MÉXICO*. [En línea] 01 de 11 de 2017. [Citado el: 23 de Octubre de 2019.] <https://www.mms-mexico.com/art%3%adculos/qu%3%a9tipo-de-mquinas-se-estn-comprando-en-m%3%a9xico>.
11. abas ERP. *abas ERP*. [En línea] 02 de Abril de 2018. [Citado el: 18 de Octubre de 2019.] <https://abas-erp.com/es/news/mantenimiento-predictivo-40-para-la-fabrica-inteligente>.
12. Centro de Estudios de las Finanzas Públicas. *Centro de Estudios de las Finanzas Públicas*. CEFP. [En línea] 2017. [Citado el: 21 de Octubre de 2019.] [www.cefp.gob.mx/publicaciones/documento/2017/eecefp0012017.pdf](http://www.cefp.gob.mx/publicaciones/documento/2017/eecefp0012017.pdf).
13. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. INEGI. [En línea] Noviembre de 2016. [Citado el: 14 de Octubre de 2019.] [www.inegi.gob.mx](http://www.inegi.gob.mx)
14. MÉXICO, CONCANACO SERVYTUR. [En línea] 2018. [Citado el: 22 de Octubre de 2019.] <http://www.concanaco.com.mx/documentos/indicadores-estados/Puebla.pdf>