

Propuesta de un banco de pruebas para la detección de fallos en motores AC
mediante el análisis de vibraciones



JEFFERSON ANDRES VARGAS MORA

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
PROGRAMA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA
VILLA DEL ROSARIO
2022

Propuesta de un banco de pruebas para la detección de fallos en motores AC
mediante el análisis de vibraciones

JEFFERSON ANDRES VARGAS MORA
1010123615

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero en
Mecatrónica

Director
JAIR ELIAS ARAUJO VARGAS
MSc. Ing. Mecatrónico



UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
PROGRAMA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA
VILLA DEL ROSARIO
2022

Dedicatoria

Primeramente, a Dios por permitir que mi madre y mi padre lleguen hasta este punto con vida y vitalidad, para que puedan ver una de mis metas realizadas, ya que ellos son las personas que más han invertido en mí, depositando una inmensa confianza en cada decisión que tomaba, también a las personas que me han ayudado a llegar hasta este instante como docentes, compañeros y amigos.

Agradecimientos

El autor expresa agradecimiento al director de tesis al Ing. Jair Elias Araujo Vargas, por los aportes realizados y apoyo realizado, también agradezco al Ing. Oscar Manuel Duque por su apoyo constante y sus asesorías.

También agradecer a todos los docentes a todos los demás docentes que formaron parte de mi desarrollo como profesional, por sus conocimientos aportados y constantes críticas para nuestras mejoras tanto éticas como morales.

RESUMEN

Las maquinas rotativas son parte infalible de los procesos industriales; por tal razón, los encargados del mantenimiento tienen muchos factores en cuenta, con el propósito de que el equipo no llegue a la falla, considerándose que, si ocurre la falla, se tendrán pérdidas económicas debido a la suspensión de la producción, entre otros factores que puedan ocasionar las mismas. Para evitar esto, existen distintos mecanismos que detectan los fallos, uno de estos mecanismos se basa en el análisis de vibraciones.

Teniendo en cuenta lo anterior, se busca diseñar una propuesta de un banco para la detección de fallos en motores AC mediante el análisis de vibraciones; en donde inicialmente, se realizará la fundamentación teórica de los métodos de detección de fallos; seguidamente, se establecerán los criterios para el diseño del banco de pruebas, teniendo en cuenta todos los elementos que lo conforman, la instrumentación(sensores, motores) y su estructura mecánica; esto con el fin de presentar una propuesta que permita la aplicación de conocimientos y prácticas en el campo del mantenimiento.

ABSTRACT

Rotating machines are an infallible part of industrial processes; for this reason, those in charge of maintenance take many factors into account, with the purpose that the equipment does not reach failure, considering that, if the failure occurs, there will be economic losses due to the suspension of production, among other factors. that they can cause. To avoid this, there are different mechanisms that detect failures, one of these mechanisms is based on vibration analysis.

Taking into account the above, it is sought to design a proposal for a bench for fault detection in AC motors through vibration analysis; where initially, the theoretical foundation of the fault detection methods will be carried out; Next, the criteria for the design of the test bench will be established, taking into account all the elements that make it up, the instrumentation (sensors, motors) and its mechanical structure; this in order to present a proposal that allows the application of knowledge and practices in the field of maintenance.

Tabla de contenido

Dedicatoria.....	3
Agradecimientos	4
RESUMEN	5
ABSTRACT	6
Tabla de contenido	7
INTRODUCCIÓN	11
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	12
JUSTIFICACIÓN.....	13
1. OBJETIVOS.....	14
1.1. Objetivo general.....	14
1.2. Objetivos específicos.....	14
1.3. Acotaciones.....	14
1. MARCO TEORICO Y ESTADO DEL ARTE.....	15
1.1. Mantenimiento	15
1.2. Tipos de mantenimiento.....	15
1.2.1. Mantenimiento Correctivo.....	15
1.2.2. Mantenimiento Preventivo.....	18
1.2.3. Mantenimiento Predictivo	25
1.3. Termografía	27
1.4. Análisis por Ultrasonido	28
1.5. Análisis de Aceite	29
1.6. Espectrometría de Corrientes.....	30
1.7. Mantenimiento por Análisis de Vibraciones	31
1.8. Concepto de vibración y sus características.....	33
1.9. Análisis de vibraciones	34
1.9.1. Respuesta vibracional	34
1.9.2. Vibraciones generadas por desalineación.....	36
1.9.3. Vibraciones generadas por desbalance	37
1.9.4. Vibración por problemas de engranajes.....	38
1.9.5. Rodamientos	39
1.10. Instrumento para la medición de vibraciones	42

1.11. Normas ISO.....	44
2. Caracterización de los equipos.....	46
2.1. Bancos de Análisis de Vibraciones.....	47
2.1.1. Banco de balanceo dinámico en un plano.....	48
2.1.2. Banco de balanceo dinámico en dos planos	50
2.1.3. Banco de fallas en rodamientos	52
3. Propuesta del banco de pruebas.....	53
Conclusiones	68
Recomendaciones	69
Bibliografías	70
Anexo A	76
Anexo B	81
Anexo C	88
Anexo D	92

Índice de Figuras

Figura 1 Mantenimiento Correctivo.	16
Figura 2 Mantenimiento Preventivo.	18
Figura 3 Implementación del mantenimiento preventivo.	23
Figura 4 Mantenimiento Predictivo.	26
Figura 5 Cámara termográfica.	27
Figura 6 Imagen tomada de una cámara termográfica.	28
Figura 7 Análisis de Ultrasonido.	29
Figura 8 Muestras de aceite.	30
Figura 9 Análisis de Vibraciones.	32
Figura 10 Vibraciones producida por cualquier máquina.	35
Figura 11 Transformación de la señal en dominio del tiempo a la frecuencia.	36
Figura 12 Ejes desalineados.	37
Figura 13 Desbalanceo.	38
Figura 14 Espectro característico de un engranaje en buen estado.	38
Figura 15 Componentes principales de un rodamiento.	39
Figura 16 Falla en pista interna.	40
Figura 17 Falla en pista externa.	41
Figura 18 Falla en elementos rodante.	42
Figura 19 Estructura del acelerómetro.	42
Figura 20 comportamiento dinámico del acelerómetro.	43
Figura 21 Normativa ISO para vibraciones mecánicas en máquinas.	45
Figura 22 Banco de pruebas Universidad de Pamplona 2013.	46
Figura 23 Características del motor SIEMENS.	47
Figura 24 Banco de balanceo dinámico en un plano universidad de pamplona 2022.	48
Figura 25 Banco de pruebas taller de automatización, banco en un plano.	49
Figura 26 Esquema de diseño banco de un plano.	49
Figura 27 Banco de balanceo dinámico en dos planos universidad de pamplona 2022.	50
Figura 28 Banco de pruebas taller de automatización, banco en dos planos.	51
Figura 29 Esquema de diseño banco en dos planos.	51
Figura 30 Banco de fallas en rodamientos.	52
Figura 31 Banco de pruebas taller de automatización, fallas en rodamientos.	52
Figura 32 MINI ROTORMAQ.	53
Figura 33 MOTORMAQ Configuración para prácticas de desbalanceo y desalineación.	55
Figura 34 MOTORMAQ Configuración para prácticas de poleas y fallas en rodamientos.	56
Figura 35 MOTORMAQ Configuración para prácticas en cajas de engranajes.	57
Figura 36 Balanceadora horizontal Z300-G-GV.	58
Figura 37 N330 analizador portátil de vibraciones.	59
Figura 38 N600 analizador portátil de vibraciones.	61
Figura 39 Portable 3 Axis Wireless Dynamic Balance & Vibration Analyzer – DigivibeMX M30 (WiSER3X)	63
Figura 40 Banco de balanceo dinámico en un plano Fuente: Autor.	66

Índice de Gráficas

Gráfica 1 Representación de las vibraciones en plano del tiempo y sus parámetros.	33
--	----

Índice de Tablas

Tabla 1 Ventajas y desventajas del mantenimiento correctivo.....	17
Tabla 2 Ventajas y desventajas del mantenimiento preventivo.....	24
Tabla 3 Ventajas y desventajas del mantenimiento predictivo.....	32
Tabla 4 Ficha técnica del motor de los motores de uno y dos planos.....	47
Tabla 5 Matriz de análisis de las diferentes propuestas para el banco de vibraciones.....	64
Tabla 6 Costos de propuestas de bancos de vibraciones.....	65
Tabla 7 Propuesta para el Banco de análisis de vibraciones Universidad de Pamplona sede Villa del Rosario.....	66

INTRODUCCIÓN

Como una medida para solucionar los inconvenientes que se producen, por la cantidad de paradas no programadas que se suscitan actualmente, causantes de grandes pérdidas a las empresas, así como también para aumentar la confiabilidad de los equipos, entre otras, se desea la implementación del mantenimiento predictivo basado en análisis de vibraciones, en el primer capítulo de este documento tratamos los diferentes tipos de mantenimiento centrándose en el mantenimiento predictivo, los diferentes métodos de mantenimiento predictivo enfocándose en el análisis de vibraciones y los diferentes modos de falla.

En el segundo capítulo trata de la caracterización de los equipos para la realización de análisis de vibraciones en la universidad de pamplona sede villa del rosario y para finalizar en último capítulo se indaga sobre bancos y equipos especializados para el mantenimiento predictivo por análisis de vibraciones, teniendo como objetivo revivir el banco de vibraciones con el menor presupuesto posible.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la Universidad de Pamplona, sede Villa de Rosario, el mantenimiento es uno de los campos que mayor demanda tiene la carrera de Ingeniería en Mecatrónica, las materias enfocadas a este campo son IMOSI, Vibraciones mecánicas, detección y diagnóstico de fallas entre otras, en las cuales se busca la causa raíz de un fallo en un equipo; considerándose el fallo en una máquina como un estado de funcionamiento anormal[1], donde se producen pérdidas mecánicas de modo que la eficiencia del mismo se reduce significativamente, al sufrir daños mecánicos sin la atención necesaria puede quedar una máquina en estado irreparable, trayendo consigo una serie de pérdidas económicas, cierre de planta, desperdicio de materia prima, lesiones personales y/o daños[2], entre otras.

Uno de los equipos más susceptibles a los fallos son los motores, estos pueden presentar diferentes fallos, los cuales se pueden clasificar como internos o externos; para este caso de estudio se tendrán en cuenta solo aquellos en los cuales los fallos generan una respuesta vibratoria medible; dado que las vibraciones suelen presentar patrones que no son visibles para las personas, pero si para un sistema de cómputo, en donde se requieren usar técnicas de análisis de señales computacionales para ver dicho estado de funcionamiento del motor. Por consiguiente, es posible formularse la siguiente pregunta: ¿Es necesario un banco para la detección de fallos mediante el análisis de vibraciones de motores?

JUSTIFICACIÓN

La presente propuesta, se considera importante desde lo teórico, porque actualmente los sistemas de detección de fallas garantizan las condiciones de funcionamiento normal en una máquina, generando lo anterior fiabilidad en los procesos y aumento de la producción. De acuerdo con Jara y Sinchi, el análisis de vibraciones es un parámetro muy importante dentro del campo de mantenimiento, porque da señales de los defectos o fallos que pueda tener una máquina[3]; afirmando estos autores, que las fallas son predichas con anticipación a través de las vibraciones, las cuales también predicen la vida útil de la máquina.

Así mismo, esta propuesta es pertinente porque dar respuesta a la necesidad de mantenimiento que actualmente requiere la industria, específicamente los estudiantes egresados de la carrera de Ingeniería Mecatrónica, que se ocupan en este campo, considerándose el mantenimiento industrial un tema de interés para quienes cursan dicha ingeniería.

1. OBJETIVOS

1.1. Objetivo general.

Diseñar una propuesta de un banco para la detección de fallos en motores AC mediante el análisis de vibraciones.

1.2. Objetivos específicos.

1. Realizar un estudio de los métodos de detección de fallos en motores AC mediante el análisis de vibraciones.
2. Caracterizar del banco de pruebas, la instrumentación, elementos de control, procesamiento, software, necesarios para el desarrollo del banco.
3. Presentar la propuesta del banco de pruebas para la detección de fallos en motores AC mediante el análisis de vibraciones.

1.3. Acotaciones.

- El proyecto tiene como fin la propuesta para una futura implementación.
- Los precios que se propongan en la propuesta pueden variar dependiendo el tiempo que se demore la implementación.

1. MARCO TEORICO Y ESTADO DEL ARTE

1.1. Mantenimiento

Se define el mantenimiento como el conjunto de técnicas utilizadas para la conservación de los equipos e instalaciones en servicio durante el mayor tiempo posible con su máximo rendimiento [4]. El mantenimiento ha tenido varias etapas a lo largo del tiempo, la primera etapa en la cual los operarios dejaban el equipo trabajando hasta el punto donde el equipo fallaba, y en ese instante se realizaba acciones correctivas, en la segunda etapa la cual se produce a partir de la primera y segunda guerra mundial, donde ya no solo se esperaba a que el equipo fallara para proceder a hacer acciones sino que se buscaba prevenir que los equipos fallaran dando la aparición al mantenimiento preventivo y en la tercera etapa se busca predecir en qué momento va a fallar el equipo mediante el uso de técnicas de monitoreo de condiciones con el fin de tener un mantenimiento menos invasivo y con menos frecuencia de acciones de mantenimiento.

1.2. Tipos de mantenimiento.

1.2.1. Mantenimiento Correctivo.

El mantenimiento correctivo según Cacuango es aquel cuyo fin es corregir cualquier defecto en el equipo y se realiza después de una falla o avería en el activo[5], este mantenimiento también se ajusta a los equipos o activos de baja criticidad, definiendo como activo crítico aquel que tiene potencial para impactar significativamente en el logro de los objetivos de la organización[6], estos activos son fáciles reemplazar o su costo de mantenimiento es superior al activo, se pueden encontrar dos clases o tipos de mantenimiento correctivo:

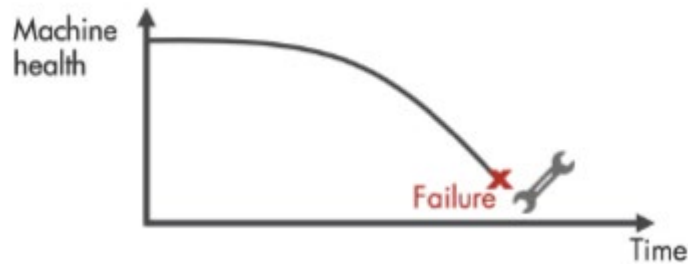
Mantenimiento Correctivo no planificado

Este mantenimiento correctivo tiene como objetivo corregir la falla siempre después de la ocurrencia o cuando se aparece un rendimiento por debajo de lo esperado[7], es decir, cuando ocurre algún tipo de urgencia o imprevisto y se han de tomar decisiones para que la maquinaria vuelva a su funcionamiento correcto lo antes posible[8].

Mantenimiento Correctivo planificado

El mantenimiento correctivo planificado implica la corrección que se realiza debido a un monitoreo predictivo o incluso por la decisión administrativa de operar hasta que ocurra la falla[9]. En la figura 1 se observa la curva característica del mantenimiento correctivo.

Figura 1 Mantenimiento Correctivo.



Fuente: Predictive Maintenance Ebook part 1, Matlab[10].

Ventajas y Desventajas del Mantenimiento Correctivo

- Las ventajas del mantenimiento correctivo no son fáciles de encontrar, según Tinga la ventaja de esta práctica es que la vida útil de las piezas y componentes se utiliza por completo, es decir, que no hay vida útil despreciada por el reemplazo de los componentes antes de que ocurra la falla[11].
- Como principales desventajas del mantenimiento correctivo según Basri tenemos los altos niveles de falla del sistema, los costos de reparación y reemplazo, también debido a fallas imprevistas el largo tiempo de inactividad, y al daño excesivo a las partes o componentes del sistema[12].

En la tabla 1 se tiene descripción de las ventajas y desventajas del mantenimiento correctivo basándose en la tabla de Pérez[13].

Tabla 1 Ventajas y desventajas del mantenimiento correctivo.

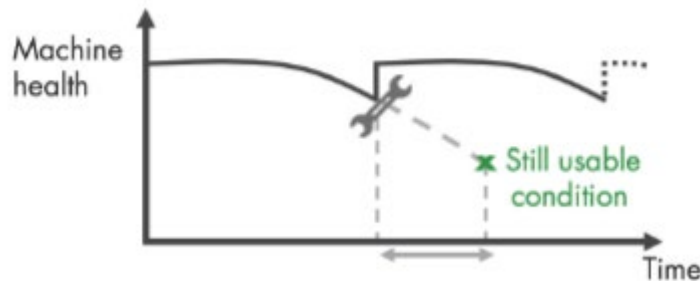
MANTENIMIENTO CORRECTIVO	
VENTAJAS	DESVENTAJAS
Prolongar la vida útil de los equipos por medio de reparaciones de componentes o piezas y corregir las fallas.	La avería o falla puede aparecer en el momento más inoportuno.
Es imposible determinar la falla.	Las averías o fallas no detectadas a tiempo pueden ocasionar daños más complejos e irreparables en los equipos.
No genera gastos fijos.	Alto inventario de repuestos.
Sin programar ni prever ninguna actividad.	La producción se vuelve impredecible y poco fiable.
Solo se gasta dinero, cuando está claro que se necesita hacerlo.	Se asumen inseguridades económicas, que pueden ser muy relevantes.
A menor plazo se ofrece un buen resultado económico.	Se disminuye la vida útil de los equipos, al no haber un diagnóstico confiable de las causas que provocan las fallas, pues se desconoce el por qué falló, por lo tanto, la falla se puede repetir una y otra vez.
	Las averías o fallos y los comportamientos anormales de los componentes, equipos o máquinas no solo ponen en peligro la buena producción, sino la seguridad de las personas, el medio ambiente y los activos de las compañías.

Fuente: Pérez[13].

1.2.2. Mantenimiento Preventivo

Roso dice que el mantenimiento preventivo comprende todas las acciones, modificaciones y mejoras dirigidas a evitar averías y las consecuencias de estas en la producción, esté se diseñó con la idea de prever y anticiparse a los fallos de las máquinas y equipos, utilizando para ello una serie de datos sobre los distintos sistemas y subsistemas e inclusive partes[14]. Suele tener un carácter sistemático, es decir, se interviene, aunque el equipo no haya dado ningún síntoma de tener un problema[15], para realizar cambios de ensambles, cambio de partes, reparaciones, ajustes, cambios de aceite y lubricantes, etc., la maquinaria, equipos e instalaciones que se considera importante realizar para evitar fallos.

Figura 2 Mantenimiento Preventivo.



Fuente: Predictive Maintenance Ebook part 1, Matlab[10].

El objetivo fundamental de mantenimiento no es contrariamente a lo que se cree y se practica en muchos departamentos de mantenimiento, reparar urgentemente las averías que surjan[15]. Los objetivos más relevantes del mantenimiento preventivo pueden ser:

Confiabilidad

Es la probabilidad de que la máquina esté operando en todo el momento que necesite el usuario.

Es importante resaltar, además, que la confiabilidad se determina para un determinado período de tiempo, el cual puede ser semanal, mensual, anual, etcétera, y bajo el contexto operacional en el cual opera el activo o el sistema. No es lo mismo, por ejemplo, una bomba que impulsa agua a otra bomba que impulsa una mezcla de caliza y agua, aquí los contextos operacionales son diferentes e influye directamente en la operación del activo, aun si ambas bombas son iguales[15].

MTBF: Tiempo medio entre fallos sucesivos[16].

$$MTBF = \frac{To_1 + To_2 + To_3}{\sum n}$$

Donde:

To : Tiempo de operación en horas, según el uso de la máquina.

n : Número de datos.

MTTR: Tiempo medio de reparación[16].

$$MTTR = \frac{TR_1 + TR_2 + TR_3}{\sum n}$$

Donde:

TR : Tiempo de reparación en horas, depende del personal de mantenimiento.

n : Número de datos.

TP: Tiempo de parada[16].

$$TP = TR + TM$$

Donde:

TR : Tiempo de reparación en horas, depende del personal de mantenimiento.

TM : Tiempo muerto en horas.

λ : Tasa de fallos (fallos por unidad de tiempo)[16].

$$\lambda = \frac{1}{MTBF}$$

Donde:

$MTBF$: Tiempo medio entre fallos sucesivos.

R: Confiabilidad de la máquina[15].

$$R = \left(\frac{MTBF}{MTBF + MTTR} * 100 \right) \%$$

Donde:

$MTTR$: Tiempo medio de reparación.

$MTBF$: Tiempo medio entre fallos sucesivos.

Disponibilidad:

Según Pérez puede definirse como la probabilidad de que una máquina sea capaz de trabajar cada vez que se le requiera.

La disponibilidad es un indicador que ofrece muchas posibilidades de cálculo y de interpretación. La definición de la fórmula de cálculo de la disponibilidad tendrá un papel vital para juzgar si el departamento de mantenimiento de cualquier instalación industrial está realizando su trabajo correctamente o es necesario

introducir algún tipo de mejora[15]. Los principales factores a tener en cuenta en el cálculo de la disponibilidad son los siguientes:

- Número de horas totales de producción.
- Número de horas de indisponibilidad total para producir, que pueden ser debidas a diferentes tipos de actuaciones de mantenimiento.
- Intervenciones de mantenimiento programado que requieran parada de planta.
- Intervenciones de mantenimiento correctivo programado que requieran parada de planta o reducción de carga.
- Intervenciones de mantenimiento correctivo no programado que detienen la producción de forma inesperada y que por tanto tienen una incidencia en la planificación ya realizada de la producción de energía.
- Número de horas de indisponibilidad parcial, es decir, número de horas que la planta está en disposición para producir, pero con una capacidad inferior a la nominal debido al estado deficiente de una parte de la instalación, que impide que ésta trabaje a plena carga.

Para este indicador se tiene la siguiente ecuación:

D: Disponibilidad total del equipo[15].

$$D = \frac{\sum \text{Disponibilidad de equipos significativos}}{\text{No de equipos significativos}}$$

Mantenibilidad

La mantenibilidad es la probabilidad que un equipo que fallo pueda ser reparado dentro de un periodo dado de tiempo, se caracteriza por el tiempo promedio para reparar (TPPR).

El tiempo promedio para reparar es un parámetro de medición asociado a la mantenibilidad, es decir, a la ejecución del mantenimiento. La mantenibilidad, definida como la probabilidad de devolver el equipo a condiciones operativas en un cierto tiempo utilizando procedimientos prescritos, es una función del diseño del equipo (factores tales como accesibilidad, modularidad, estandarización y facilidades de diagnósticos, facilitan enormemente el mantenimiento). Para un diseño dado, si las reparaciones se realizan con personal calificado y con herramientas, documentación y procedimientos prescritos, el tiempo de reparación depende de la naturaleza del fallo y de las mencionadas características de diseño[17].

TPPR: Tiempo promedio para fallar[17].

$$TPPR = \frac{\text{tiempo de averías}}{\text{número de averías}}$$

μ : Tasa de operación (reparaciones por unidad de tiempo)[16]. También llamada factor de servicio, mide el tiempo efectivo de operación de un activo durante un periodo determinado

$$\mu = \frac{1}{MTTR}$$

Donde:

MTTR: Tiempo medio de reparación.

Las categorías del mantenimiento preventivo (MP) son las siguientes:

- **Cubrimiento del MP:** revisar el porcentaje del equipo o máquina críticos, para las cuales se han desarrollado programas de MP.
- **Ejecución del MP:** el porcentaje de rutinas del MP que han sido terminadas según programa.
- **Trabajos generados por las repeticiones del MP:** el número de acciones de mantenimiento que han sido solicitadas y tiene como origen rutinas del MP.

Figura 3 Implementación del mantenimiento preventivo.



Fuente: Pérez [13]

En la tabla 2 se tiene descripción de las ventajas y desventajas del mantenimiento preventivo basándose en la tabla de Pérez[13].

Tabla 2 Ventajas y desventajas del mantenimiento preventivo.

MANTENIMIENTO PREVENTIVO	
VENTAJAS	DESVENTAJAS
Disminuye las anomalías o fallas y los tiempos muertos (aumentando la disponibilidad de las máquinas, equipos e instalaciones).	Todo programa que se inicia genera un incremento en los costos.
Aumenta la vida útil de las máquinas, equipos, componentes e instalaciones.	
Hay una mejora efectiva en el uso de los recursos.	Para iniciar se necesita de tiempo extra en el trabajo del personal de mantenimiento. Búsqueda de la información, como manuales, historial, fichas técnicas, repuestos, inventarios, reparaciones, etc. Actualizar información, generación de procedimientos, instructivos.
Se disminuyen o se reducen, los niveles de inventarios de repuestos.	
Hay un ahorro económico a largo y mediano plazo.	
Elaboración de planes de mantenimiento.	
Se definen indicadores de gestión o de desempeño.	Tiempo para transferir la información recolectada.
Se documentan procedimientos, instructivos. Se mantiene actualizada la información	
Se implementan buenas inspecciones de rutinas.	Técnicos de mantenimiento, trabajo de campo adicional. Taxonomía de los equipos. Materiales utilizados, tiempos, etc.
Implementación de un buen programa de lubricación.	
Se aumenta la seguridad industrial para las personas.	Dotación, ordenamiento de almacenes. Rotación de repuestos, actualizar información, inventarios.
Se mejora el enfoque de contaminación ambiental.	
Disminución de pagos de horas extras, que se generan continuamente.	Se elevan costos, por entrenamientos, capacitaciones para el personal.
Se aumenta el cumplimiento de la entrega oportuna de producción.	

Fuente: Pérez[13].

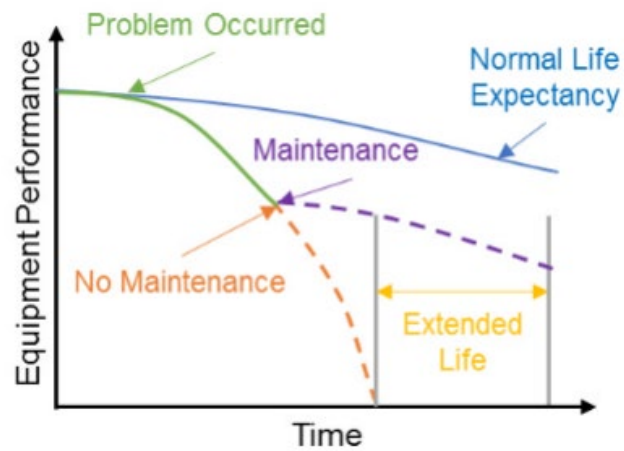
1.2.3. Mantenimiento Predictivo

Es un método utilizado para identificar a tiempo una futura avería de alguna parte de una máquina, que a través de una planificación se pueda sustituir el componente antes de que este falle. Se basa en el seguimiento, análisis, control y monitoreo de parámetros de la máquina[18].

En general, la premisa de la que parte cualquier estrategia de mantenimiento predictivo es que una monitorización de condición[19] regular del estado, la eficiencia de operación y otros indicadores de interés de un sistema industrial que proporcionarán los datos necesarios para asegurar un máximo intervalo de tiempo entre reparaciones, de esta manera, se conseguirá minimizar la cantidad y el coste de posibles intervenciones imprevistas requeridas para solucionar fallos, cabe destacar que esta monitorización requiere de la presencia de sensores específicos, no es suficiente con el seguimiento por parte del usuario, incluso aunque este posea conocimientos técnicos acerca del sistema industrial en cuestión[20]. Existen dos motivos principales para ello:

- Por un lado, los algoritmos que predicen la aparición de fallos funcionan mejor con una cantidad muy grande de datos, por lo que su rendimiento se optimiza si disponen de información en tiempo real y casi continua del estado de las máquinas, que un operario dedique la totalidad de su jornada laboral a revisar y transcribir parámetros como temperatura o vibración de una máquina sería muy ineficiente (y, además, tremendamente aburrido, lo cual también viene a ser contraproducente)[21].
- Por otro lado, el desgaste de las piezas de un sistema industrial se produce normalmente en la parte interior de las mismas, ya que es ahí donde hay rozamientos o flujo de líquidos[22]. Esto complica mucho su inspección, en definitiva, la puesta en marcha del mantenimiento predictivo pasa por la incorporación de sensores que automaticen la toma de datos.

Figura 4 Mantenimiento Predictivo.



Fuente: Lee.[23][24]

Entre las practicas más comunes del mantenimiento predictivo se tiene:



Fuente: Autor.

1.3. Termografía

La termografía según Ferreira es una práctica amplia en la aplicación de detección de fallos térmicos ya sea en subestaciones, línea eléctrica así mismo en la mecánica, se sabe que, si detectas un equipo o componente con temperaturas altas, es decir por encima de lo normal en las inspecciones realizadas con cámara termo gráfica, se concluye que algo está mal, lo cual puede ocasionar fallas en todo el sistema[25].

De acuerdo con lo mencionado anteriormente con respecto a la termografía, podemos mencionar que se coincide en que es una técnica no invasiva, esto quiere decir que no es necesario detener una máquina, o que el inspector tenga un contacto directo con los equipos para poder detectar una falla. Lo cual puede ser beneficiosa para la integridad de las personas[26].

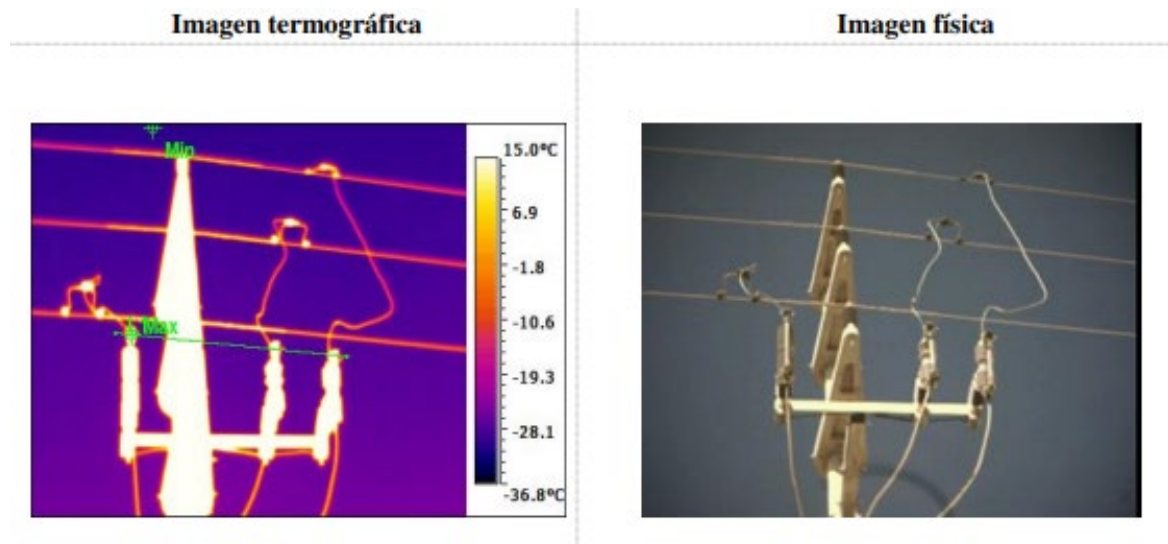
Los equipos de termografía infrarroja como el mostrado en la Figura 5 proporcionan información sobre la temperatura superficial de los objetos como el que se aprecia en la Figura 6. No obstante, es importante recordar que estos instrumentos no miden directamente temperatura, sino radiación infrarroja dentro un rango de longitud de onda determinado. Los valores de energía detectada por el sensor (W/cm^2sr) son convertidos en valores de temperatura mediante un algoritmo incorporado en el dispositivo basado en la Ley de Stefan Boltzmann[27].

Figura 5 Cámara termográfica.



Fuente: Carvallo[26].

Figura 6 Imagen tomada de una cámara termográfica.



Fuente: Bances Vidaurre [28]

1.4. Análisis por Ultrasonido

Para Asencio el análisis por ultrasonido se basa en las ondas de sonido de alta frecuencia (ultrasonidos) que producen las variaciones microscópicas de las fuerzas de rozamiento en una máquina, permitiendo una detección mucho más temprana que la esperada en un análisis de vibraciones debido a un aumento de las vibraciones o en la termografía en un aumento de la temperatura. Esto permite un margen más amplio de actuación para realizar un plan de mantenimiento sin consecuencias graves en el sistema[29].

En la Figura 7 demuestra la tecnología que se puede aplicar en el sector automotriz, este tipo de tecnología permite detectar fallos prematuros o fugas presurizadas y no presurizadas antes de que el vehículo se averíe, lo que permite disminuir los tiempos de reparación y los costos. La inspección de partes móviles en el auto con ultrasonidos detecta los fallos en etapas tempranas del problema, antes de que sean detectados por otros métodos tradicionales basados en la temperatura, sonidos fuertes o mal funcionamiento de las partes, ya que la

advertencia ultrasónica aparece antes de que se produzca un aumento de temperatura o un incremento en los niveles de vibración de baja frecuencia[30].

Figura 7 Análisis de Ultrasonido.



Fuente: Morales[29]

1.5. Análisis de Aceite

El análisis de aceites estudia las propiedades fisicoquímicas y el tamaño de las partículas del fluido, utilizado en una determinada máquina, ayudando así a conocer la operación y el estado de la misma. El aceite, por su función lubricante, tiende a contaminarse y, por ello, se debe sustituir cada determinado tiempo (mantenimiento preventivo). Sin embargo, cuando el aceite presenta, en su composición, determinados contaminantes (como partículas metálicas o degradación del mismo), es síntoma que la máquina no funciona correctamente y esto se puede identificar con el estudio del aceite usado. El grado de contaminación del aceite está relacionado con la presencia de partículas de desgaste, de sustancias extrañas o degradación química de su composición[31].

Además, sirve para controlar las propiedades físicas y químicas del lubricante, como son la viscosidad, acidez, contaminantes como agua, hollín, lodos, punto de inflamación, dilución por combustible en el caso de motores. Estos datos permiten conocer si el producto utilizado mantiene las propiedades mínimas y es apto para continuar en servicio. Al mismo tiempo, mediante análisis espectro gráfico del aceite se puede determinar metales de desgaste, los cuales permiten determinar cuál componente mecánico se están desgastando de una manera anormal, permitiendo encontrar la raíz del problema[32].

Figura 8 Muestras de aceite.



Fuente: Soto[33]

1.6. Espectrometría de Corrientes

Esta técnica conocida como Análisis de Firma Eléctrica o MCSA (del inglés: Motor Current Signature Analysis), consiste en analizar la señal de las corrientes del estator mediante un sensor de efecto Hall. Se analizan las frecuencias y los componentes de la señal, y mediante técnicas de inteligencia artificial se detectan los fallos asociados a esas características de la señal[34].

El análisis de las características que posee la corriente, voltaje y frecuencia de un motor de inducción, es una técnica de supervisión que se usa para evaluar la condición de los motores eléctricos, este método tiene la característica de no necesitar detener la planta, y aprovecha las características de las señales que producen mientras el motor está en plena función[35]. En la técnica del MCSA, para detectar fallos normalmente se emplea la transformada de Fourier para analizar el espectro de la corriente. La detección del fallo se realiza a través de una línea que aparece en el espectro cuando el motor sufre ese fallo[36].

1.7. Mantenimiento por Análisis de Vibraciones

El estudio técnico-científico de las vibraciones mecánicas está directamente relacionado con el mantenimiento predictivo, pues suministran alertas al ser indicativo de fallos presentes o posibles en el medio plazo.

Las vibraciones pueden ser producidas por:

- Vibraciones libres: Estas son producidas por un sistema que vibra a causa de una fuerza que ya no actúa sobre el activo.
- Vibraciones forzadas: Son vibraciones que se producen por un medio del exterior, estas vibraciones suelen estar relacionadas con las máquinas rotativas o con otras que presenten movimientos alternos sujeto a alguna regla de periodicidad[32].

En el análisis de vibraciones se puede detectar el aumento de esfuerzos y tensiones que sufren los elementos, las deformaciones superiores al margen elástico, fatiga en los materiales, el desgaste que presentan y se puede detectar por donde ocurre una pérdida de energía y por ende mayor consumo energético. Las vibraciones son consideradas como una de las mejores formas de evaluar las condiciones mecánicas de un equipo o maquinaria, la vibración es un síntoma de una falla potencial, cuyo origen se puede determinar mediante el análisis espectral de la frecuencia de vibración. Los elementos que caracterizan una señal de vibración son: su frecuencia, su ángulo de fase y su amplitud, debido a que cada equipo o máquina funcionan dentro de unos parámetros ya establecidos de funcionamiento en condiciones normales, un cambio en estos parámetros se puede interpretar que necesita una intervención[37].

Figura 9 Análisis de Vibraciones.



Fuente: Espinoza [38]

Tabla 3 Ventajas y desventajas del mantenimiento predictivo.

MANTENIMIENTO PREDICTIVO	
VENTAJAS	DESVENTAJAS
Optimización del tiempo para realizar el mantenimiento, maximización de la reserva de uso de piezas y equipos.	Necesidad de elegir la instrumentación de medida y diagnóstico, debido a la necesidad de no dejar fuera de servicio a la máquina.
La ejecución del mantenimiento se realiza sin alterar el normal funcionamiento de las instalaciones y equipos.	Inversión económica inicial elevada.
Mejoramiento de las condiciones higiénicas y de seguridad en la planta.	Personal técnico calificado para el manejo del equipo y para realizar los diagnósticos.

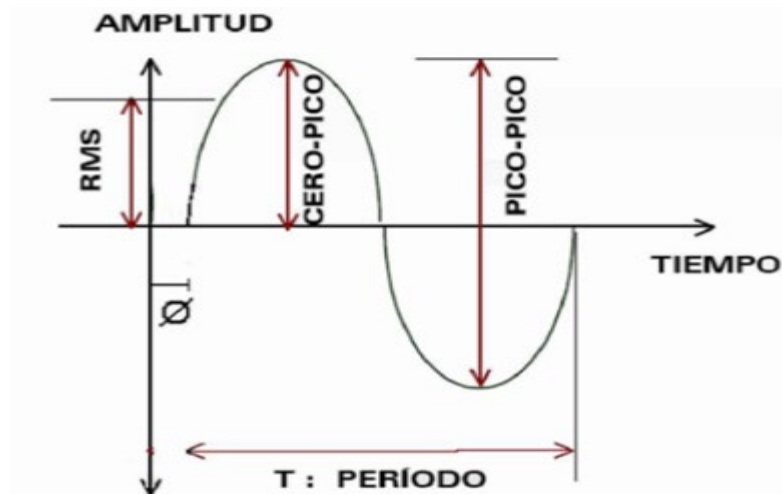
Fuente: Autor.

1.8. Concepto de vibración y sus características

Para continuar con la fundamentación teórica sobre el análisis de vibraciones, en primer lugar, se define la vibración como la oscilación o el movimiento repetitivo de un objeto alrededor de una posición de equilibrio generada por factores externos a dicha superficie. Siendo las vibraciones el resultado de las fuerzas dinámicas en las máquinas o estructuras que tienen partes en movimiento o sometidas a acciones variantes [39]; las cuales poseen dos características principales en magnitud, la frecuencia que corresponde al número de veces que tiene lugar el movimiento cíclico completo en un segundo, y su unidad de medida son los Hercios (Hz) y la amplitud de la vibración que corresponde a la intensidad de la misma [40].

Así mismo, las vibraciones tienen otros parámetros, como son el desplazamiento que determina la cantidad de movimiento que la masa experimenta con respecto al reposo, el periodo que indica el tiempo que tarda la masa en realizar un ciclo completo y otros parámetros como la velocidad y la aceleración [39], como se observa en la gráfica 1.

Gráfica 1 Representación de las vibraciones en plano del tiempo y sus parámetros.



Fuente: <https://midebien.com> [online][39].

Por otro lado, además de reconocer las características de las vibraciones, es necesario realizar el análisis de las mismas, para poder inferir que tipo de fallo presenta una máquina; considerando que, el termino fallo representa la desviación de operación normal en una maquina o sistema dinámico, por lo tanto, un fallo puede ser corregido y volver a la función normal del sistema. Cuando se presenta un fallo el sistema cambia el comportamiento, pero no deja de funcionar, es decir, el sistema continúa funcionando, pero no satisface el propósito completamente[1].

1.9. Análisis de vibraciones

El análisis de vibraciones permite la identificación de problemas en las máquinas antes de que se vuelvan demasiado graves y provoquen una falla; Según la ISO 14224, el término falla es usado para indicar el estado de un sistema que se encuentra inhabilitado para llevar a cabo su función. Considerándose, este punto un evento irrecuperable, donde el componente o la máquina se ha detenido completamente[1], consecuencia de no haber realizado un análisis a tiempo, situación que debe evitarse.

Una de las ventajas de realizar un análisis de vibraciones a tiempo, es que estos diagnósticos se llevan a cabo mientras la maquinaria está en funcionamiento, no es necesario ningún tiempo de inactividad. De acuerdo con Paredes, si se supervisa regularmente la vibración, se puede detectar diversidad de fallas, las cuales pueden estar relacionadas con los rodamientos deteriorados o defectuosos, el aflojamiento mecánico y los engranajes desgastados o rotos[41].

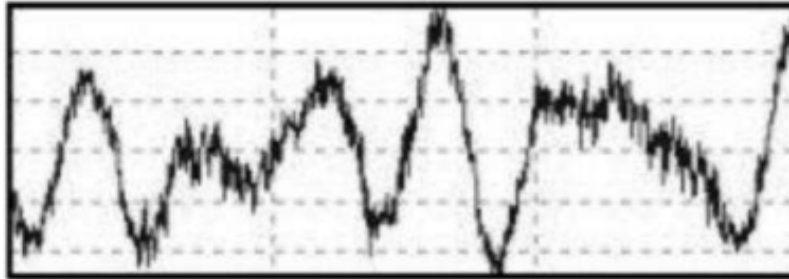
1.9.1. Respuesta vibracional

La vibración es un indicio de una situación normal o anormal de una máquina; es decir, toda máquina genera vibraciones en su actividad tradicional, pero, cuando uno de sus componentes falla, las características de estas vibraciones cambian, los cuales se pueden solucionar identificando el tipo y lugar de la falla, lo que facilita la rápida reparación correctiva o el respectivo mantenimiento preventivo.

Teniendo en cuenta, que las máquinas son un conjunto de varias piezas, las vibraciones que experimentan son la suma de todas las señales de vibración que

proviene de cada una, en la Figura 10 se observa una señal de vibración producida por cualquier máquina.

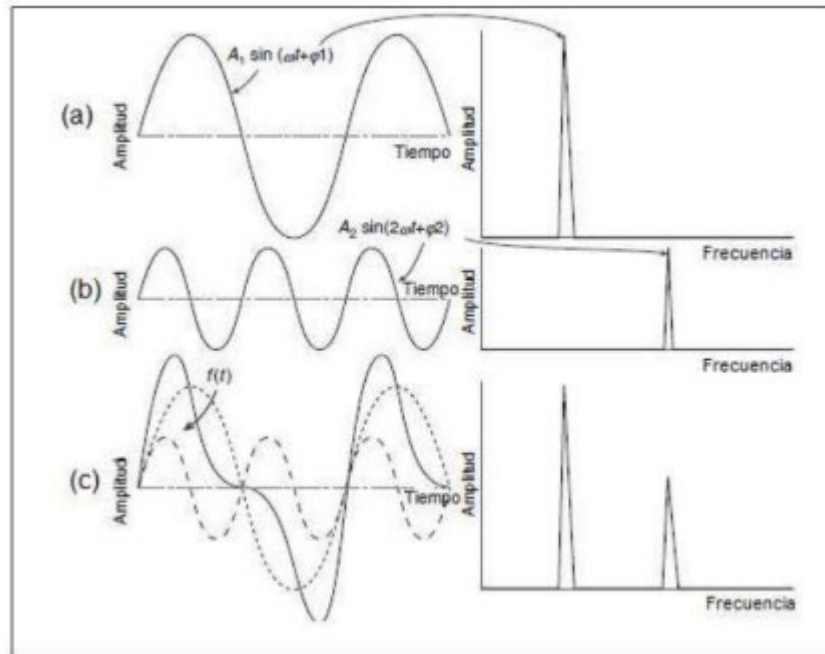
Figura 10 Vibraciones producida por cualquier máquina.



Fuente: Guanaga [42].

Igualmente, las señales de vibraciones son complejas, para lo cual es necesario transformarlas en señales más sencillas y con esto simplificar la interpretación y el análisis, mediante la Transformada Rápida de Fourier (FFT), la cual capta la señal en el tiempo, la transforma en una serie de ondas sinusoidales y finalmente las conduce al dominio de la frecuencia. En el caso específico del desalineamiento se considera que por cada giro del eje con desalineamiento paralelo en sólo una de sus direcciones radiales (caso más general) en consecuencia se producirá una componente con el pico igual a la velocidad de giro de la máquina (Figura 11a), posteriormente y debido a la variación en la rigidez del acoplamiento producto del desalineamiento, se genera una segunda componente al doble de la fundamental (2 eventos por cada vuelta del eje) como se observa en la Figura 11b. Al sumar ambas componentes (Figura 11c), se obtiene como resultado una gráfica de forma extraña y compleja cuyas ondas dependen de la relación de fase entre una componente y la otra. Mediante la FFT se logra transformar esta señal en el tiempo al dominio de la frecuencia[42].

Figura 11 Transformación de la señal en dominio del tiempo a la frecuencia.

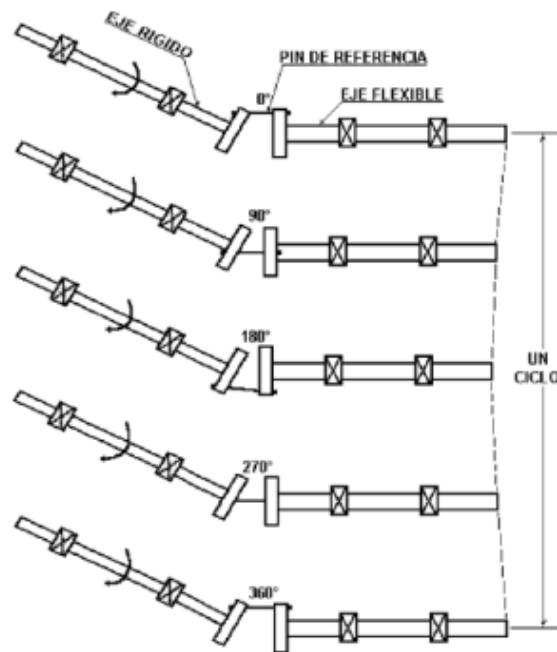


Fuente: Guanaga [42].

1.9.2. Vibraciones generadas por desalineación

Otro de los fallos en las máquinas, es la desalineación entre dos ejes acoplados, la cual produce una fuerza en los cojinetes que dependen en gran parte de la precarga rotativa y de la rigidez del eje, en la mayoría de los casos estas fallos son difíciles de solucionar; para lo cual, es fundamental reconocer aspectos y variables relacionados con el tipo de cojinete, las especificaciones técnicas del acople, las limitaciones del equipo de alineación, el tipo de vibración que se produce con las diferentes variaciones de desalineación, entre otras[43]. De acuerdo con ASME (American Society of Mechanical Engineers), cuando existe un desalineamiento angular se presenta una vibración axial que tiene una frecuencia de 1 RPM[42], como se observa en la Figura 12.

Figura 12 Ejes desalineados.

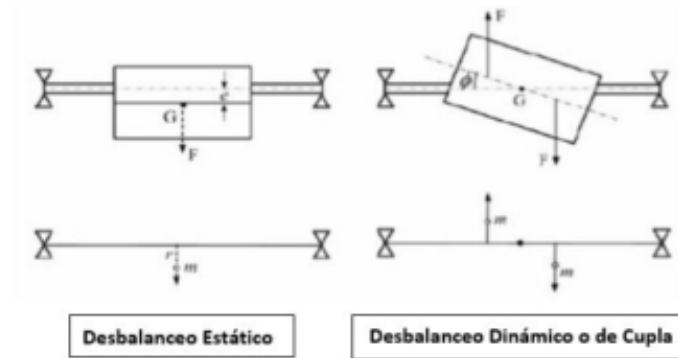


Fuente: Oliveira [7]

1.9.3. Vibraciones generadas por desbalance

Una vibración generada por desbalance, se evidencia en la distribución desigual de la masa alrededor del eje central de rotación de un rotor, lo que genera una fuerza o movimiento en sus cojinetes resultado de las fuerzas centrífugas. La vibración debida al desbalance de un rotor es el tipo de defecto de maquinaria más común. Existen tres tipos de desbalance, y estos son: desbalance estático, desbalance par y desbalance dinámico[41].

Figura 13 Desbalanceo.

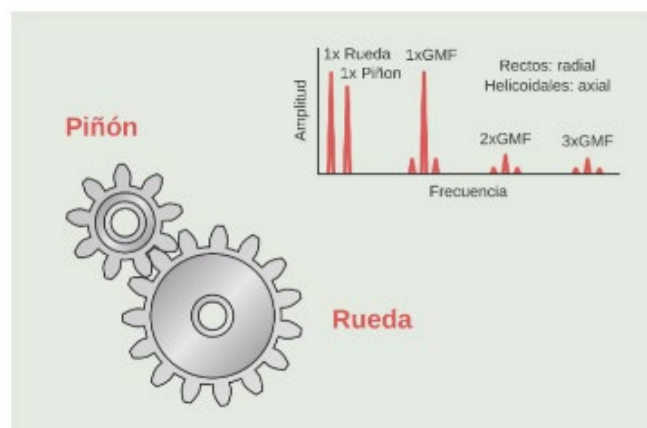


Fuente: [https://esp.cbmconnect.com\[online\]\[44\]](https://esp.cbmconnect.com[online][44])

1.9.4. Vibración por problemas de engranajes

Las vibraciones inherentes al funcionamiento de cualquier transmisión por engranajes son ocasionadas por el error de transmisión (ET), el cual se refiere a la diferencia de la posición angular del eje de salida entre una transmisión perfecta y una transmisión real. Las vibraciones producidas por el error de transmisión tienen tiempo determinado por la frecuencia con que los dientes ingresan sucesivamente en contacto, la que es llamada frecuencia de engrane. Se lo puede demostrar con las transmisiones de ejes fijos a diferencia de transmisión planetaria[38].

Figura 14 Espectro característico de un engranaje en buen estado.

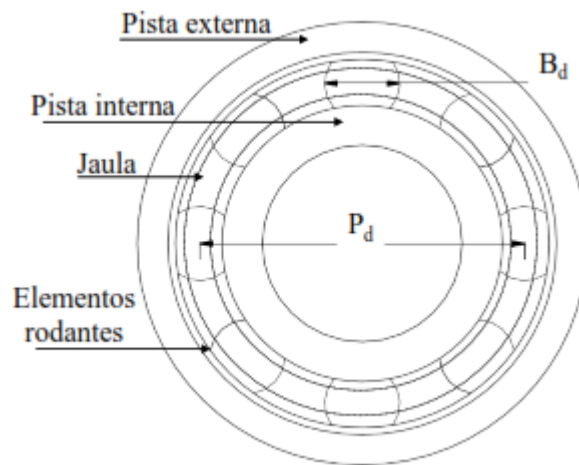


Fuente: [https://power-mi.com/frecuencias-propias-de-un-engranaje\[online\]\[45\]](https://power-mi.com/frecuencias-propias-de-un-engranaje[online][45])

1.9.5. Rodamientos

Un rodamiento está compuesto de una pista interna y externa, una jaula y elementos rodantes, en cualquiera de estas partes pueden ocurrir defectos y causar vibraciones de alta frecuencia, en la mayoría de los casos es posible detectar defectos en los componentes del rodamiento de acuerdo a la frecuencia específica de vibración que ha sido excitada[46].

Figura 15 Componentes principales de un rodamiento.

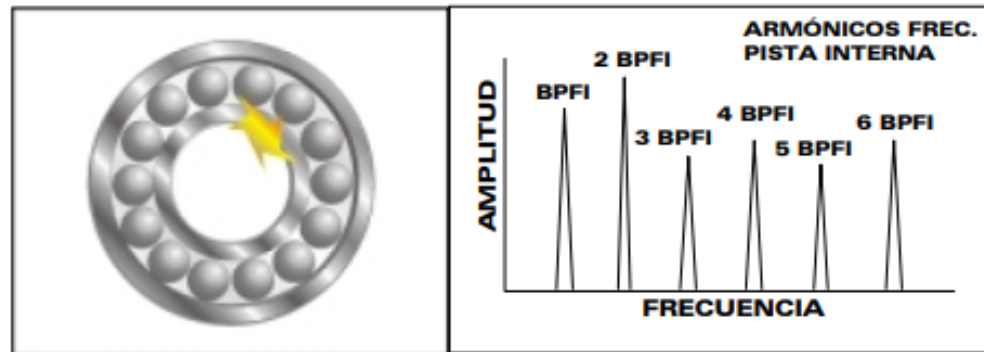


Fuente: González[46]

Falla en pista interna

Puede ser producido por agrietamiento del material en la pista interna, producido por errores de ensamble, esfuerzos anormales, corrosión, partículas externas o lubricación deficiente. Se produce una serie de armónicos siendo los picos predominantes 1X y 2X RPS la frecuencia de falla de la pista interna, en dirección radial. Además, el contacto metal - metal entre los elementos rodantes y las pistas producen pulsos en el dominio del tiempo del orden de 1-10 KHz. El rodamiento debe ser reemplazado, debido a que la falla seguirá incrementándose. Antes revise el estado de lubricación del rodamiento[47].

Figura 16 Falla en pista interna.

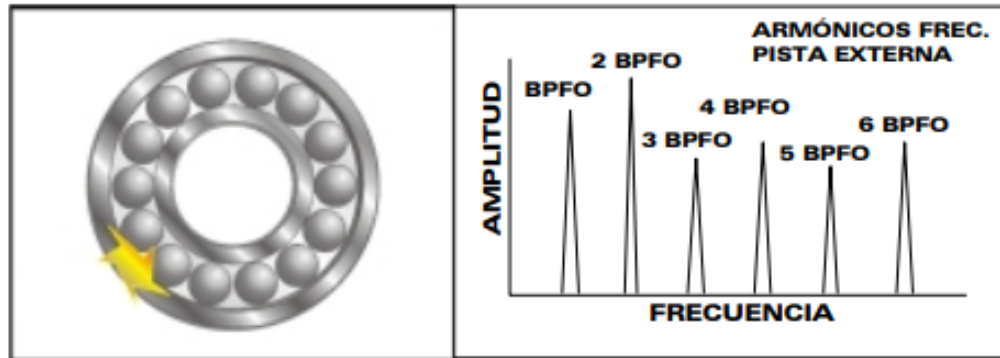


Fuente: Tutorial de vibraciones A-MAQ S.A. [47]

Falla en pista externa

Puede ser producida por agrietamiento del material en la pista externa, producido por errores de ensamble, esfuerzos anormales, corrosión, partículas externas o lubricación deficiente. Se produce una serie de armónicos siendo los picos predominantes 1X y 2X RPS la frecuencia de falla de la pista externa, en dirección radial. Además, el contacto metal - metal entre los elementos rodantes y las pistas producen pulsos en el dominio del tiempo del orden de 1-10 KHz El rodamiento debe ser reemplazado, debido a que la falla seguirá incrementándose. Antes revise el estado de lubricación del rodamiento[47].

Figura 17 Falla en pista externa.

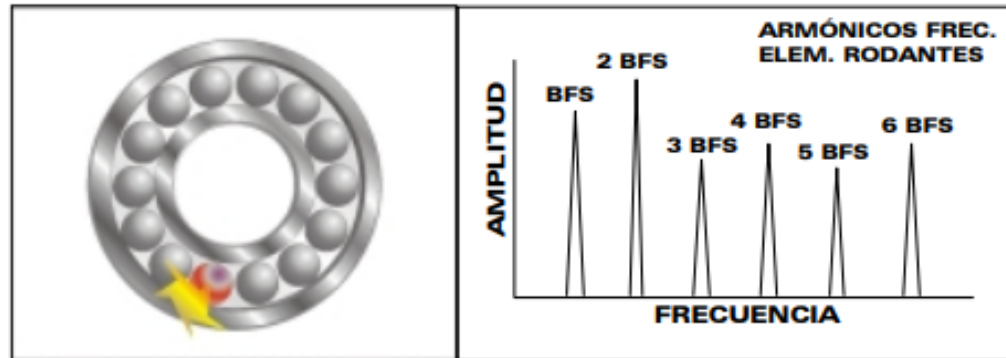


Fuente: Tutorial de vibraciones A-MAQ S.A. [47]

Falla en elementos rodante

Puede ser producida por agrietamiento, del material en los elementos rodantes, producido por errores de ensamble, esfuerzos anormales, corrosión, partículas externas o lubricación deficiente. Se produce una serie de armónicos siendo los picos predominantes 1X y 2X RPS la frecuencia de falla de los elementos rodantes, en dirección radial. Además, el contacto metal - metal entre los elementos rodantes y las pistas producen pulsos en el dominio del tiempo del orden de 1-10 KHz El rodamiento debe ser reemplazado, debido a que la falla seguirá incrementándose. Antes revise el estado de lubricación del rodamiento[47].

Figura 18 Falla en elementos rodante.

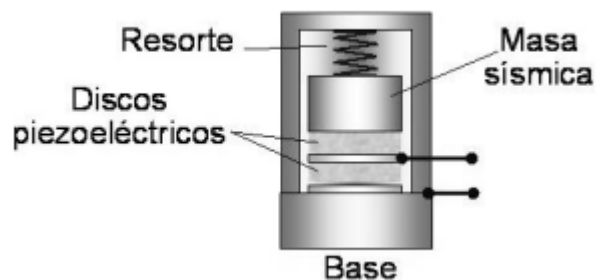


Fuente: Tutorial de vibraciones A-MAQ S.A. [47]

1.10. Instrumento para la medición de vibraciones

Teniendo en cuenta lo anterior, se necesita un instrumento capaz de medir las vibraciones, el acelerómetro piezoeléctrico es el transductor más utilizado para medir vibraciones, la configuración de tipo a compresión, a continuación, se describe su funcionamiento:

Figura 19 Estructura del acelerómetro.



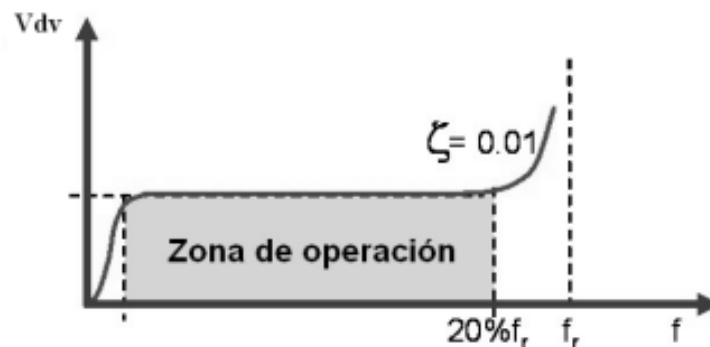
Fuente: Jara[3].

Los discos piezoeléctricos se encuentran entre la base y la masa, generalmente los elementos piezoeléctricos son de cuarzo u otros materiales sintéticos, este

elemento al deformarse por acción de cierta fuerza, genera una carga eléctrica entre sus superficies. El elemento piezoeléctrico tiene un límite en función de la temperatura, al llegar al punto curie o temperatura curie, pierde la propiedad piezoeléctrica tornándose defectuoso para el funcionamiento. La fuerza que se requiere para mover la masa sísmica es proporcional a la aceleración de la masa, en un movimiento del acelerómetro en dirección arriba - abajo, la fuerza que se ejerce sobre el cristal produce la señal de salida, que es proporcional a la aceleración del transductor. El nivel más bajo que puede detectar el acelerómetro, está determinado por el ruido electrónico del sistema. Mientras que el nivel más alto a detectar este dado por la destrucción del mismo elemento piezo -eléctrico.

El rango de frecuencias detectadas, se extiende desde frecuencias muy bajas hasta varias decenas de kilohertzios. Estas frecuencias altas están limitadas por la resonancia de la masa sísmica y la elasticidad del elemento piezo-eléctrico. Dicha resonancia produce un pico alrededor de 30 kHz en la respuesta de la frecuencia natural del transductor. Normalmente un acelerómetro se puede usar alrededor de $1/3$ de su frecuencia natural. Algunos acelerómetros tienen un preamplificador interno de circuito integrado (PCI). Este tipo de acelerómetro tiene un límite de baja frecuencia que es generalmente a 1 Hz. En la Figura 20 se muestra el comportamiento dinámico del acelerómetro. Si la frecuencia de resonancia f_r es mayor, será posible medir frecuencias más altas, sin embargo, por este aumento el acelerómetro piezo-eléctrico disminuye en su sensibilidad[3].

Figura 20 comportamiento dinámico del acelerómetro.



Fuente: Jara[3]

1.11. Normas ISO

Las normas ISO 10816 parte 1[48] e ISO 13373 parte 1[49], regulan aspectos generales sobre el monitoreo de la condición por análisis de vibraciones, ambas se complementan para entregar guías durante todo el proceso, desde la elección de sensores hasta el diagnóstico y evaluación de severidad de falla. A continuación, se presentan los aspectos de evaluación de severidad de falla, establecimiento de alarmas y ubicación de los sensores.

En particular, la Norma ISO 10816 parte 1, es aplicada a mediciones de vibración en partes no rotativas y establece una clasificación de máquinas de acuerdo a su potencia, según las siguientes clases:

- Clase I: Partes individuales de motores y máquinas, integralmente conectadas a un sistema, en condiciones de operación normal. Motores de producción eléctrica de hasta 15kW, son ejemplos típicos de máquinas en esta categoría.
- Clase II: Máquinas de tamaño mediano, típicamente motores eléctricos con potencias de salida entre 15kW y 75kW, sin fundaciones especiales. Máquinas o motores rígidamente montados en fundaciones especiales, hasta 300kW.
- Clase III: Grandes motores principales y grandes máquinas con masas rotantes montadas sobre fundaciones rígidas y fuertes, las cuales son relativamente rígidas en la dirección de medición.
- Clase IV: Grandes motores principales y grandes máquinas con masas rotantes montadas sobre fundaciones relativamente débiles en la dirección de medición, por ejemplo, turbogeneradores y turbinas a gas con potencias de salidas mayores a 10MW.

En la figura 21 se puede ver la clasificación de la normativa ISO para vibraciones mecánicas en máquinas

Figura 21 Normativa ISO para vibraciones mecánicas en máquinas.

NORMATIVA ISO PARA VIBRACIONES MECÁNICAS EN MÁQUINAS Y EQUIPOS ROTATIVOS							
PEQUEÑO 15 KW		MEDIANO 15 KW – 75 KW		GRANDE		TURBO	
VELOCIDAD mm/s RMS		VELOCIDAD mm/s RMS		VELOCIDAD mm/s RMS		VELOCIDAD mm/s RMS	
0,28	A	0,28	A	0,28	A	0,28	A
0,45		0,45		0,45		0,45	
0,71	B	0,71	B	0,71		0,71	
1,12		1,12		1,12		1,12	
1,80	C	1,80	C	1,80	B	1,80	B
2,80		2,80		2,80		2,80	
4,50	D	4,50	D	4,50	C	4,50	
7,10		7,10		7,10		7,10	
11,20		11,20		11,20	D	11,20	C
18,00		18,00		18,00		18,00	
28,00		28,00		28,00		28,00	D
45,00		45,00		45,00		45,00	

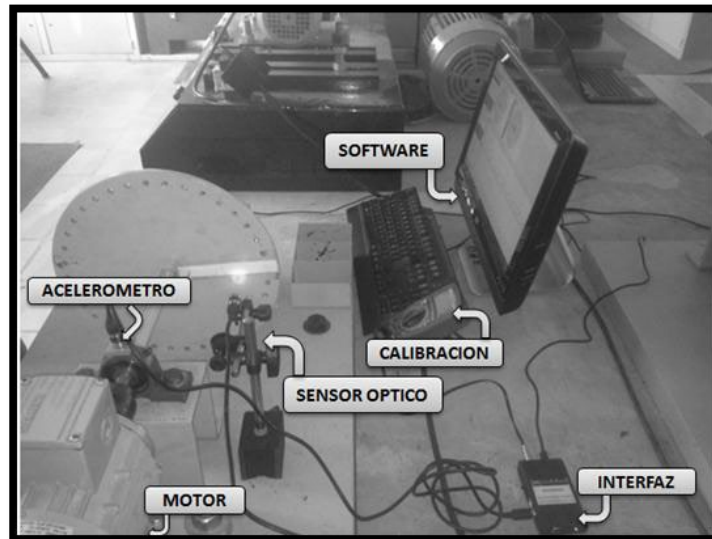
A = bueno B = aceptable C = aún aceptable D = inaceptable

Fuente: Mercante[50]

2. Caracterización de los equipos

Para la caracterización de los bancos de análisis de vibraciones se tomó como referencia la tesis de Escruceria y Rojas, en la cual se evidencia el funcionamiento del banco, en cual se basará para realizar la debida caracterización.

Figura 22 Banco de pruebas Universidad de Pamplona 2013.

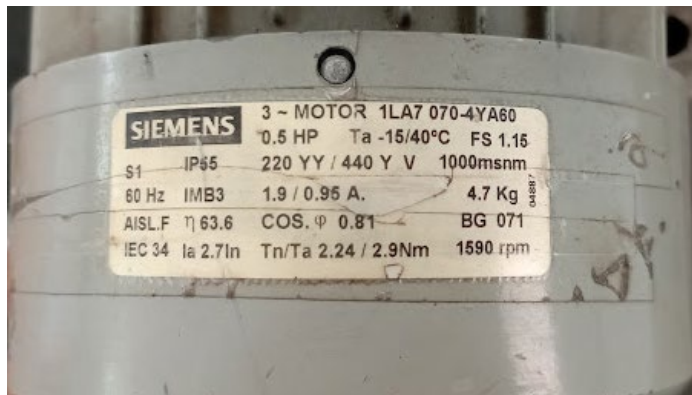


Fuente: Escruceria y Rojas [51]

Los Datos fueron obtenidos del taller de Automatización Industrial de la universidad De Pamplona, el cual cuenta con diferentes bancos de trabajo como lo son el motor en un plano, en dos planos y banco para diagnóstico de fallas en rodamiento; los materiales ya mencionados son el Sensor acelerómetro Tipo A, el sensor óptico tipo B, una interfaz y el software DigivibeMX (Véase la Figura 18).

Para conocer más detalladamente se hará una descripción de los motores y los bancos de prueba, los cuales cuentan con un motor Marca Siemens y con las

Figura 23 Características del motor SIEMENS.



siguientes características:

Fuente: Autor.

Tabla 4 Ficha técnica del motor de los motores de uno y dos planos.

POTENCIA	2/3 KW
FRECUENCIA	60 Hz
VOLTAJE	220YY / 440YV
CORRIENTE	1.9/0.95 A
FACTOR DE SERVICIO	1.15
PESO	4.7 Kg
VELOCIDAD	1590 RPM
EFICIENCIA	63.6%

Fuente: Autor.

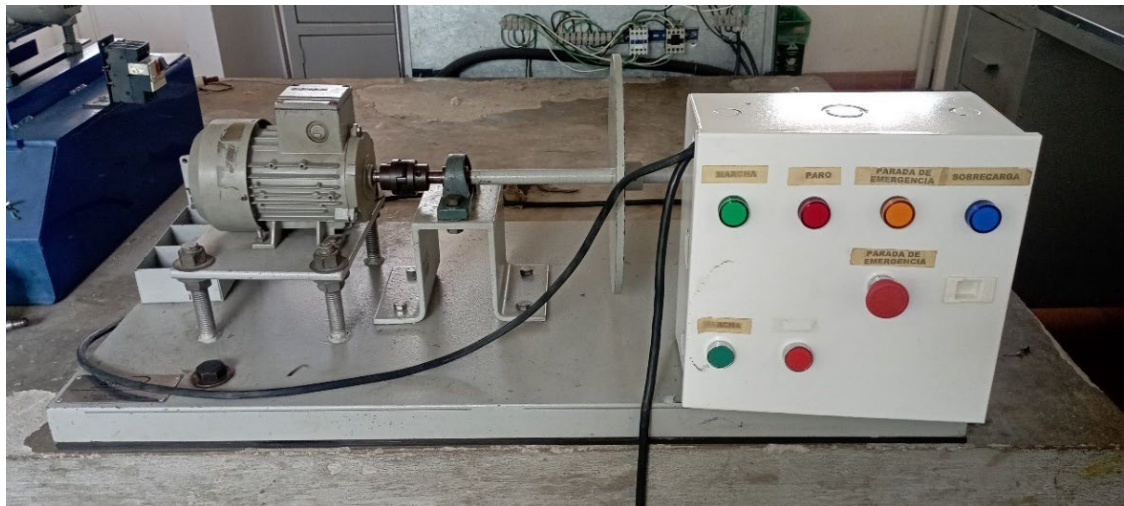
2.1. Bancos de Análisis de Vibraciones

2.1.1. Banco de balanceo dinámico en un plano

Este banco busca familiarizar al estudiante con los diferentes sistemas que plano de balanceo, como lo son las bombas centrífugas, ventiladores, ejes, esmeriles, entre otros maquinas que se pueden encontrar en la industria cerámica.

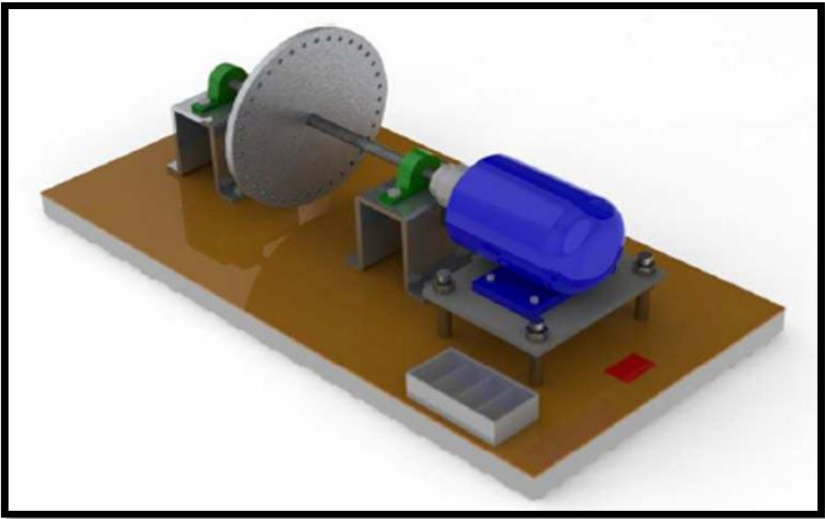
Para realizar el balanceo dinámico en un plano se requiere el equipo para la recepción datos y un banco de pruebas para que se compone de las piezas que se muestran en la figura 26:

Figura 24 Banco de balanceo dinámico en un plano universidad de pamplona 2022.



Fuente: Autor

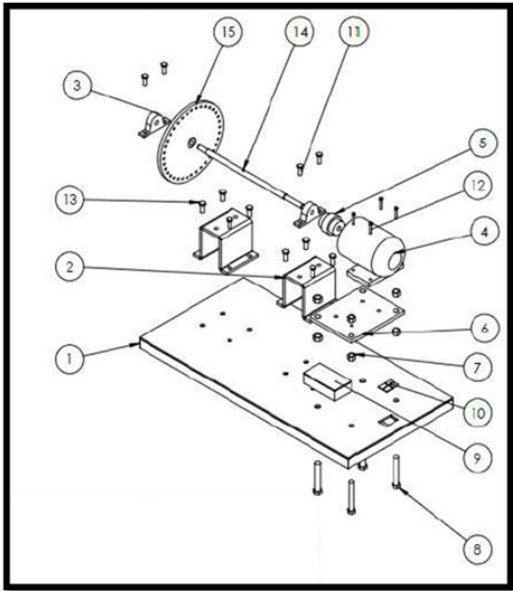
Figura 25 Banco de pruebas taller de automatización, banco en un plano.



Fuente: INDCO LTDA[52]

El esquema del diseño del banco en un plano es el siguiente:

Figura 26 Esquema de diseño banco de un plano.



No.	Descripción	Unidades
1	base	1
2	Soporte Chumacera	2
3	Chumacera de Pedestal	2
4	Motor Siemens	1
5	Acople de Araña	1
6	Base Motor	1
7	Tuerca de Ajuste	8
8	Pernos de Sujeción	4
9	Goma de soporte	1
10	control encendido	1
11	Tornillo base de chumacera	4
12	Tornillo base del motor	4
13	tornillo de chumacera	8
14	eje de acero	1
15	Plano.	1

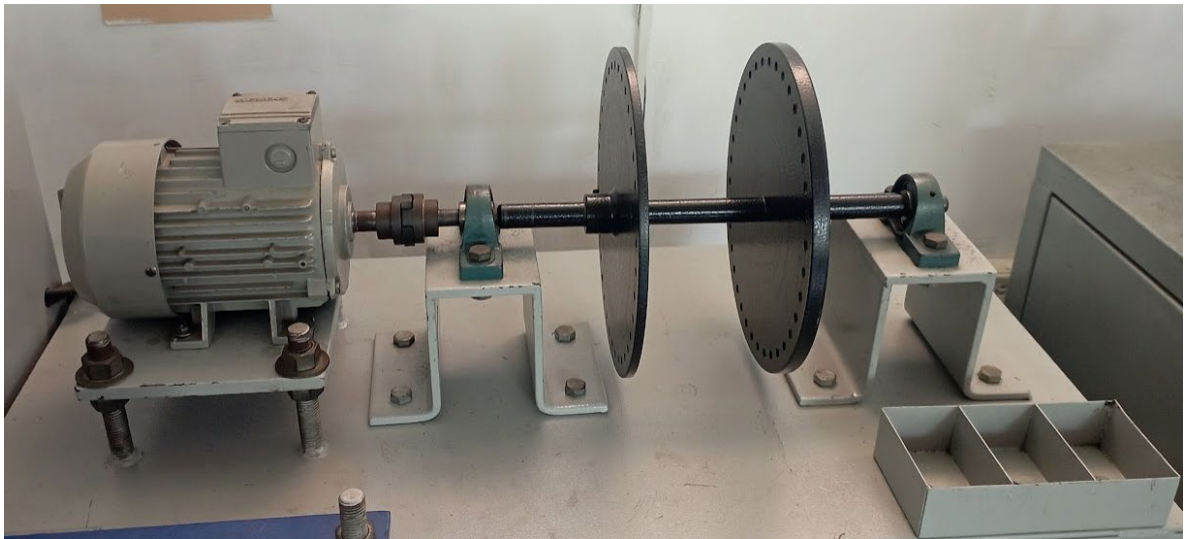
Fuente: INDCO LTDA[52]

2.1.2. Banco de balanceo dinámico en dos planos

Este banco busca familiarizar al estudiante con los diferentes sistemas que plano de balanceo, como lo son las bombas centrifugas, ventiladores, ejes, esmeriles, entre otros maquinas que se pueden encontrar en la industria cerámica.

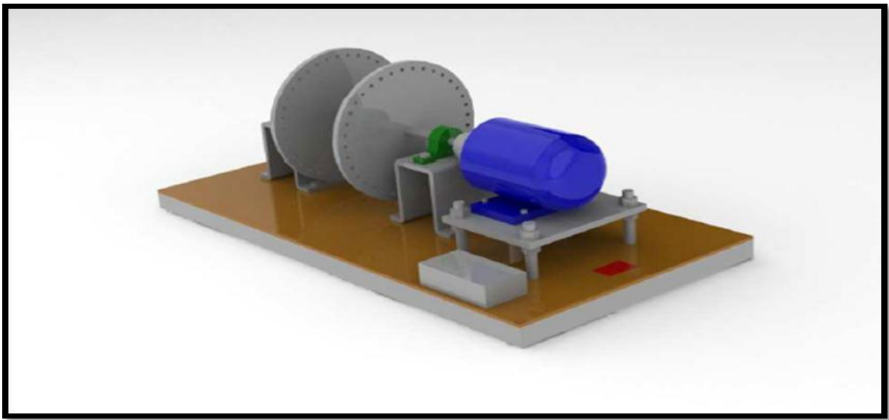
Para realizar el balanceo dinámico en dos planos se requiere el equipo para la recepción datos y un banco de pruebas para que se compone de las piezas se observa en figura 29:

Figura 27 Banco de balanceo dinámico en dos planos universidad de pamplona 2022.



Fuente: Autor

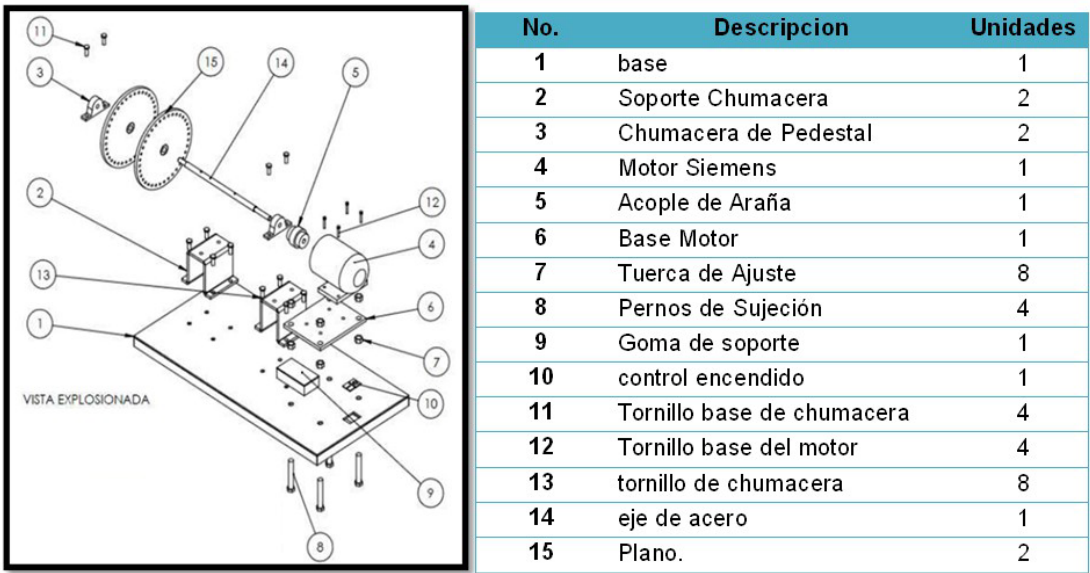
Figura 28 Banco de pruebas taller de automatización, banco en dos planos.



Fuente: INDCO LTDA[52]

El esquema del diseño del banco en dos planos es el siguiente:

Figura 29 Esquema de diseño banco en dos planos.

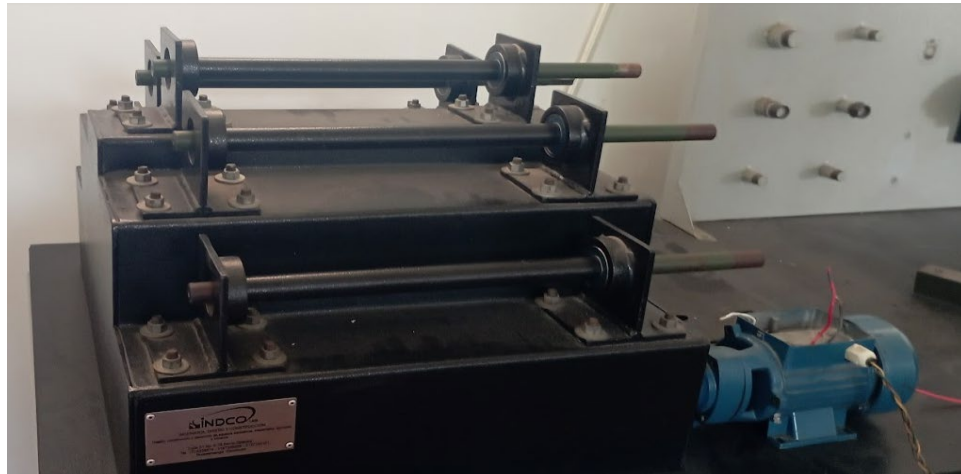


Fuente: INDCO LTDA[52]

2.1.3. Banco de fallas en rodamientos

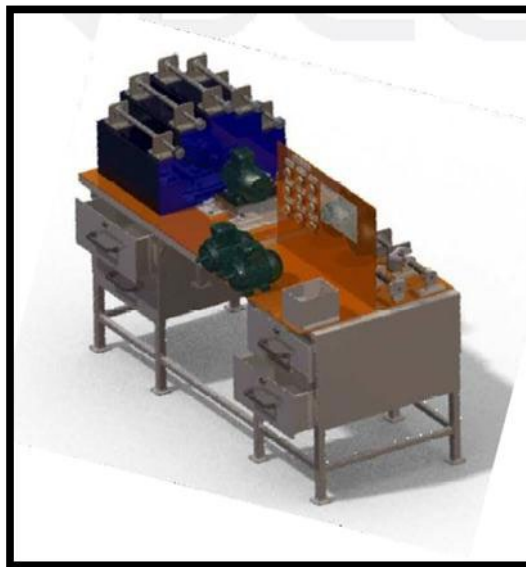
En este banco se pretende hacer emitir los rodamientos dañados con el poder realizar futuros diagnósticos este banco se pretende hacer que el estudiante conozca las diferentes señales que emiten los rodamientos dañados con el ánimo de que se familiarice con las mismas para diagnósticos en fallas de rodamientos.

Figura 30 Banco de fallas en rodamientos.



Fuente: Autor

Figura 31 Banco de pruebas taller de automatización, fallas en rodamientos



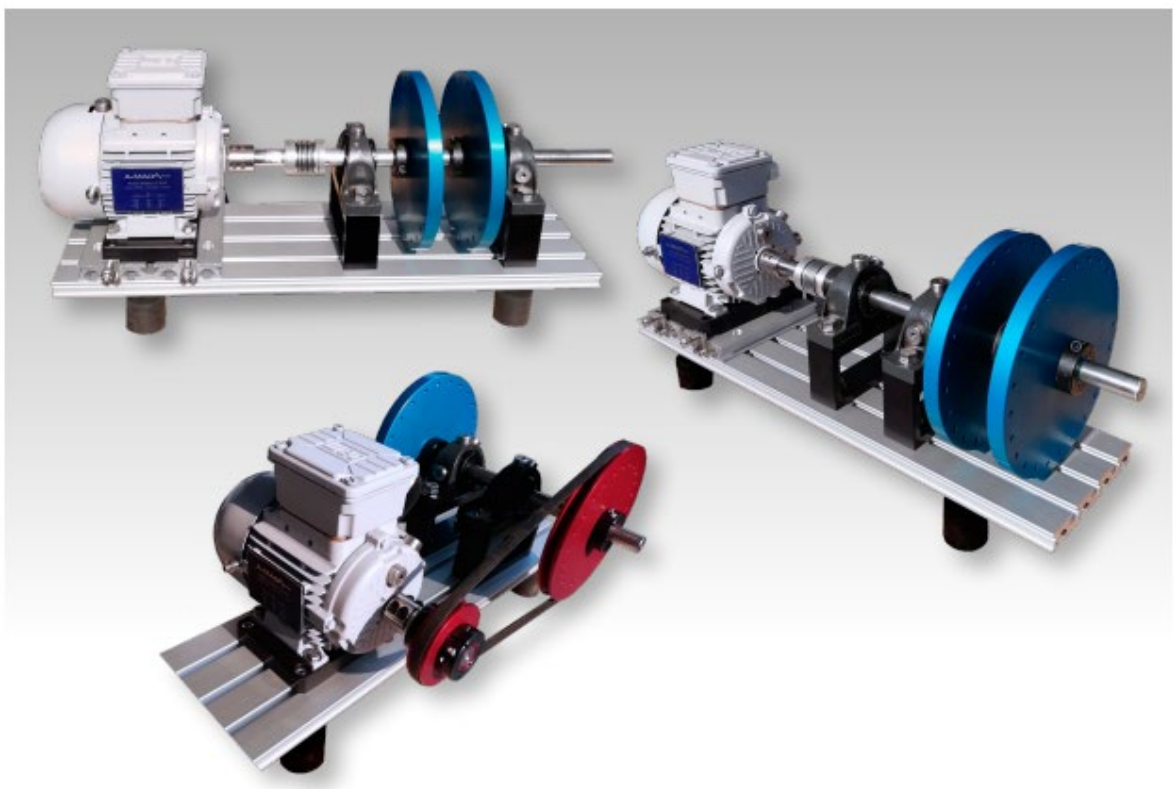
Fuente: INDCO LTDA[52]

3. Propuesta del banco de pruebas.

Para este capítulo se buscó equipos con la finalidad de seleccionar la que mejor se ajuste a la necesidad del programa de ingeniería en mecatrónica de Villa del Rosario.

Primeramente, se tenía los bancos fallas por vibraciones de A-MAQ, el primero es el MINI ROTORMAQ en el se puede tener diferentes modos de falla tales como desbalanceo, prácticas en poleas, fallas en rodamientos y desalineación, en la figura 32 se observa el banco.

Figura 32 MINI ROTORMAQ.



Fuente: Anexo A.

Los componentes que incluyen el MINI ROTORMAQ se pueden observar en el anexo A.

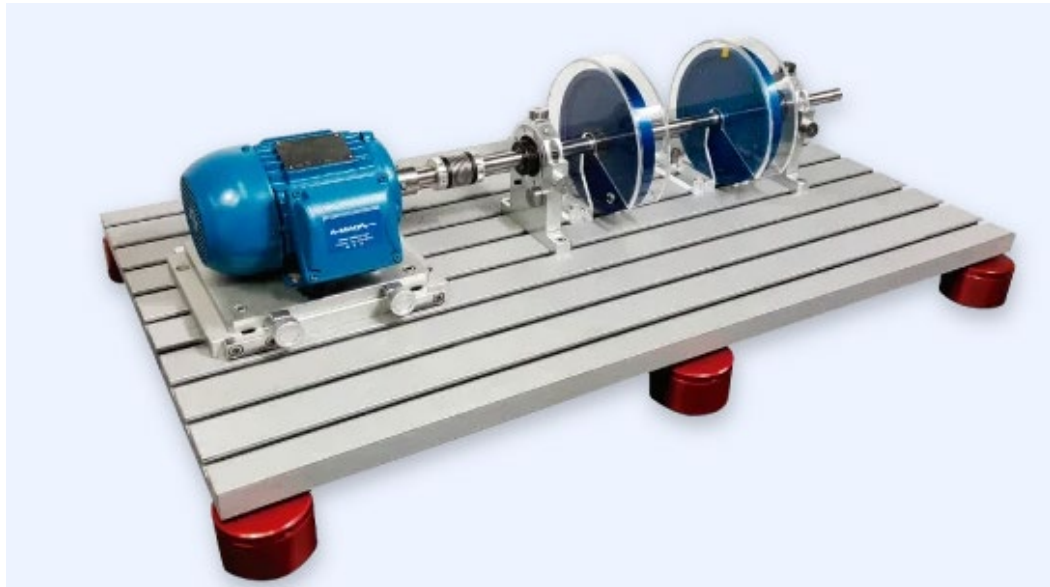
El siguiente banco también es de la familia A-MAQ y es el ROTORMAQ a comparación con el anterior este banco tiene un módulo de modos de falla más el cual es fallas en engranajes y cajas de engranajes.

Configuración para prácticas de desbalanceo y desalineación:

A continuación, algunas de las prácticas que pueden realizarse con esta configuración:

- Introducción a la medición de vibraciones.
- Interpretación de las formas de onda y espectros de vibración.
- Posicionamiento de sensores de vibración.
- Definición de los puntos de medición.
- Desbalanceo en 1 y 2 planos.
- Desbalanceo estático y dinámico.
- Desalineamiento entre ejes: Paralelo, angular y mixto.
- Cambios en la respuesta del eje, ante el desplazamiento axial de rotores y soportes de rodamiento.

Figura 33 MOTORMAQ Configuración para prácticas de desbalanceo y desalineación.



Fuente: Anexo B

Configuración para prácticas de poleas y fallas en rodamientos

A continuación, algunas de las prácticas que pueden realizarse con esta configuración:

- Influencia de la velocidad en la respuesta vibratoria.
- Influencia de la tensión de la banda en la respuesta vibratoria.
- Desalineación de poleas.
- Comparación entre banda en buen estado y banda dañada.
- Respuesta vibratoria de un rodamiento con y sin carga radial (por polea y banda con tensión modulable).
- Detección de rodamientos con: falla en pista interna, externa, bolas y falla mixta.

Figura 34 MOTORMAQ Configuración para prácticas de poleas y fallas en rodamientos.



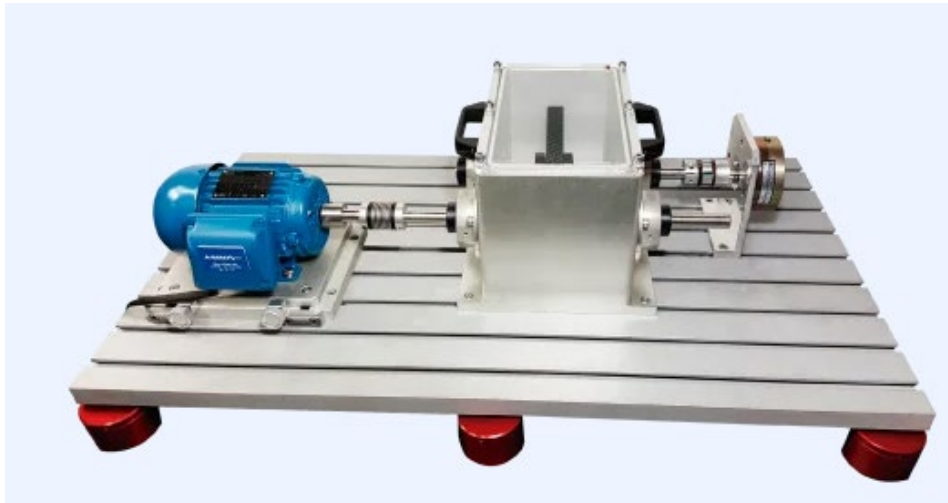
Fuente: Anexo B

Configuración para prácticas en cajas de engranajes

A continuación, algunas de las prácticas que pueden realizarse con esta configuración:

- Influencia del tipo de engranaje (recto o helicoidal) en la respuesta vibratoria.
- Identificación por vibraciones de engranaje con diente dañado.
- Influencia de la lubricación.
- Influencia de la carga (freno) en la respuesta vibratoria.

Figura 35 MOTORMAQ Configuración para prácticas en cajas de engranajes.



Fuente: Anexo B

Los componentes que incluyen el ROTORMAQ se pueden observar en el anexo B.

El siguiente banco es de la empresa CEMB hace parte de la gama de equilibradoras horizontales y es el Z300-G-GV

Figura 36 Balanceadora horizontal Z300-G-GV.



Entre sus principales características tenemos:

- Rotores hasta 450 kg.
- Equilibradora con transmisión por cardán y motor de velocidad variable. Cubre una amplia gama de aplicaciones.
- Instrumento tipo B11.
- Pedestales rígidos soportan el rotor equilibrado sobre carros de rodillos, regulables en altura.
- En el interior de los pedestales se colocan bases como transductores de fuerza (piezoeléctricos).
- Disponible como transmisión doble, tanto cardán como transmisión por correa.

Los equipos a continuación son analizadores portátiles de vibraciones, el primero de ellos es el N330 también de la marca CEMB.

Figura 37 N330 analizador portátil de vibraciones.



El analizador N330 es una solución rápida e inteligente para el análisis de vibraciones y entre sus características tenemos:

- Un vibrómetro balanceador portátil de dos canales.
- Analizador de máquinas con pantalla gráfica de 4,3":
- Acelerómetro de hasta 10 kHz.
- Analizador de máquinas con función de balanceo estático y dinámico.

Diseño ergonómico

Un instrumento de trabajo pesado, medidor de vibraciones portátil simple y ergonómico, diseñado para controles de vibraciones extremadamente rápidos en cualquier máquina rotativa en espacios estrechos. La interfaz gráfica fácil de usar con corrección en tiempo real ayuda a los ingenieros a evaluar las condiciones de los rodamientos para ayudar a los ingenieros a planificar sus actividades y realizar un mantenimiento predictivo.

Funciones rápidas y sencillas.

Con el N330, puede medir el nivel de vibración total (aceleración, velocidad, desplazamiento) e identificar los picos de frecuencia más importantes que indican cualquier anomalía de la máquina rotativa. El N330 es capaz de equilibrar tanto un plano como dos planos. Ahora es posible realizar un cambio secuencial entre los canales 1-A y 1-B evitando una medida incorrecta de cada plano.

Gran espacio de memoria

El N330 tiene 14,8 GByte de espacio y se puede expandir a 128 GByte, lo que le brinda espacio para almacenar más de 1000 lecturas de medición.

El Brochure del equipo portable N330 se pueden observar en el anexo C.

El segundo equipo de los analizadores portátiles es N600 también le pertenece a la Empresa CEMB.

Figura 38 N600 analizador portátil de vibraciones.



Este es un instrumento portátil de dos canales con pantalla a color de 7" para balanceo y análisis de vibraciones hasta 10 KHz, posee un puerto mini USB permite la transferencia de datos a una PC mediante una tarjeta de memoria, para aquellos que quieren realizar funciones complejas de forma fácil e intuitiva; entre sus características tenemos:

Balanceo y análisis de vibraciones en mano

Analizador de Vibraciones extremadamente potente y versátil, diseñado para verificaciones vibraciones extremadamente rápidas, balanceo en condiciones de servicio, análisis detallado en cualquier máquina rotativa.

Eficiencia, ventajas y ahorro de costes gracias a un perfecto equilibrio

N600 proporciona la información necesaria para la organización del mantenimiento predictivo, es la mejor solución para intervenciones técnicas, sala de pruebas, I+D y servicio técnico de equilibrado y análisis de vibraciones, el instrumento portátil

N600 a través de un análisis detallado de las vibraciones, permite el control y solución de cualquier problema de vibraciones de forma sencilla, rápida e intuitiva mediante un potente software diseñado para facilitar el trabajo del operador.

Funciones del instrumento

- Análisis avanzado de vibraciones, FFT y solución de problemas de máquinas rotativas Balanceo de rotación en 1 o 2 planos de corrección.
- Análisis de vibraciones en función del tiempo y la velocidad (diagrama de Bode).
- Run Up and Coast Down para búsqueda de frecuencias críticas.
- Análisis de las formas de onda en el dominio del tiempo Medición de fase de vibración.
- Análisis de frecuencia de vibración Medición de vibración general (aceleración, velocidad, desplazamiento).

El Brochure del equipo portable N600 se pueden observar en el anexo D.

Para finalizar tenemos el Portable 3 Axis Wireless Dynamic Balance & Vibration Analyzer – DigivibeMX M30 (WiSER3X), el cual es conjunto de software y sensores para el análisis de vibraciones, esta opción se plantea con el propósito de que a través de proyectos y futuras tesis se reparen los bancos mencionados en el capítulo II.

Figura 39 Portable 3 Axis Wireless Dynamic Balance & Vibration Analyzer – DigivibeMX M30 (WiSER3X)



Este es un equipo de equilibrio dinámico y análisis de vibraciones, todo en un solo software, que aprovecha al máximo las herramientas más poderosas que DigivibeMX M30 tiene para ofrecer.

- Equilibrado Dinámico en 2 Planos.
- FFT y TWF completos.
- Esta versión de DigivibeMX es compatible con Phantom, de esta manera obtienes Condition Monitoring completo en el mismo software.
- 1 licencia M30 para 3 instalaciones.
- 1 acelerómetro monoaxial inalámbrico Wiser 3X (WiSER 3X) y base magnética.
- 1 cable adaptador para cargar la batería.
- 1 tacómetro láser y base magnética.

- 1 cable de 2 m (tacómetro).
- 1 estuche blando

Para finalizar se hizo una matriz donde se tuvieron en cuenta los diferentes modos de fallas que nos ofrecía cada una de las anteriores propuestas, se tuvo en cuenta el costo que se requiere implementar las propuestas y también el fácil uso ya sea de los bancos o de los equipos que posean material referente en cual los estudiantes o docentes se puedan apoyar para la implementación de las clases.

Tabla 5 Matriz de análisis de las diferentes propuestas para el banco de vibraciones

	ROTORMAQ 	Mini ROTORMAQ 	Z300-G-GV 	Portable 3 Axis Wireless Dynamic Balance & Vibration Analyzer. 	N330 A dual-channel portable balancer vibrometer and machine analyser balancing function. 	N600 Multipurpose Dual channel vibrometer for vibration analysis and balancing. 
MODOS DE FALLAS	5	4	1	3	2	3
COSTO	1	3	2	5	3	3
FACIL USO	4	4	4	5	5	5
TOTAL	10	11	7	13	10	11

Fuente: Autor.

En los modos de fallas se dice que 5 es aquella propuesta que presente más casos de estudio y 1 aquella propuesta que tiene modalidades de uso muy básicas, los modos de falla que se tuvieron en cuenta fueron los siguientes:

- Fallas por desbalanceo.
- Fallas por desalineación.
- Holgura mecánica eje-agujero.
- Soltura estructural.

- Prácticas en poleas o excentricidad.
- Fallas en rodamientos.
- Fallas en engranajes.

En los costos se analizaron los precios de las propuestas dándole un 5 a aquellas propuestas que no superaban un presupuesto de 4'000.000 de pesos colombianos y a medida que se aumenta el costo se reduce su ponderado en la matriz.

Para el fácil uso se tuvo en cuenta que las propuestas de los equipos posean material referente en internet o manuales de uso en cual los estudiantes o docentes se puedan apoyar para la implementación de las clases.

De las propuestas obtenidas se realizó un análisis costos – beneficio, teniendo en cuenta la premisa de que la estructuración y componentes mecánicos ya se encuentran en el laboratorio GM 105 de Mecatrónica.

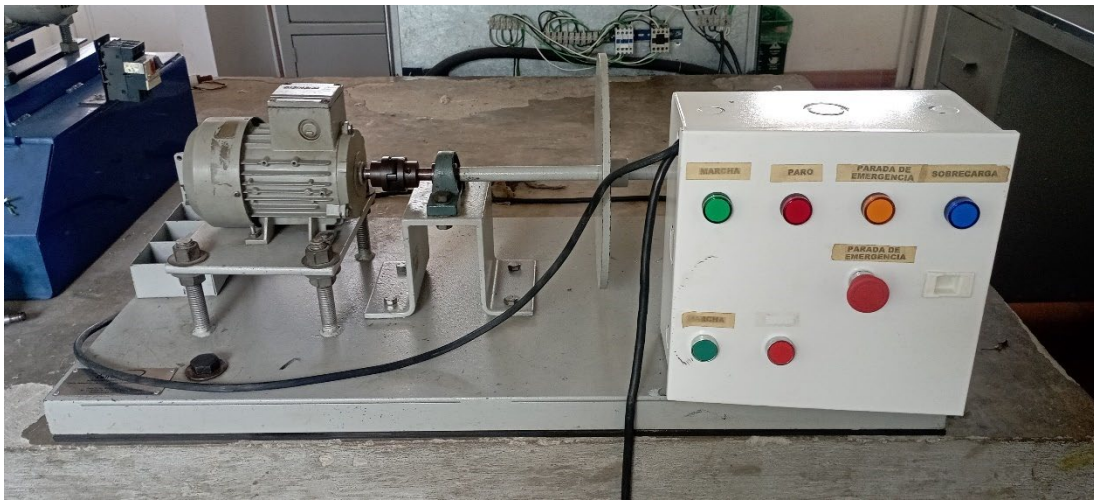
Tabla 6 Costos de propuestas de bancos de vibraciones.

ROTORMAQ  \$ 96.000.000,00 Precio sin IVA y sin envío	Mini ROTORMAQ  \$ 28.000.000,00 Precio sin IVA y sin envío	Portable 3 Axis Wireless Dynamic Balance & Vibration Analyzer.  \$ 2.025.241,64 Precio sin envío
--	---	---

Fuente: Autor.

Determinado que no es necesario la adquisición del banco completo sino la idea es aprovechar los componentes de los bancos de análisis de vibraciones y su estructura mecánica, los cuales se encuentran en el laboratorio de Mecatrónica, descartando las dos opciones que ofrecían el banco completo reduciendo así costos, teniendo en presente que este semestre cursado en la materia de IMOSI ha puesto en funcionamiento el banco de balanceo dinámico en un plano.

Figura 40 Banco de balanceo dinámico en un plano



Fuente: Autor

Lo dicho anteriormente y según el análisis de las matrices se plantea la siguiente propuesta.

Tabla 7 Propuesta para el Banco de análisis de vibraciones Universidad de Pamplona sede Villa del Rosario.

PROPUESTA PARA EL BANCO DE ANALISIS DE VIBRACIONES EN LA UNIVERSIDAD DE PAMPLONA		
PRUDUCTO		PRECIO (MXN)
	Portable 3 Axis Wireless Dynamic Balance & Vibration Analyzer – DigivibeMX M30 (WiSER3X) \$8,049.95 Dynamic Balancing and Vibration Analysis all in one software. Take full advantage of the most....	\$8,049.95
INCLUYE		
1 licencia M30 para 3 instalaciones. 1 acelerómetro monoaxial inalámbrico Wiser 3X (WISER 3X) y base magnética. 1 cable adaptador para cargar la batería. 1 tacómetro láser y base magnética 1 cable de 2 m (tacómetro). 1 estuche blando		
PESO	8.81 lbs	
DIMENSIONES	11.02 × 9.44 × 12.2 in	
CONTACTO		
info@erbessd-instruments.com +52 (55) 5367 2302 +52 (55) 6280 7654		
TOTAL (COP)		\$ 2.025.241,64

Fuente: Autor.

Conclusiones

Del estudio de las vibraciones en motores se identificaron los principales modos de falla que pueden ocurrir en elementos rotativos, tales como fallas por desalineación, fallas en rodamientos, fallas en engranajes, entre otros.

De la caracterización de los bancos se observó la falta de componentes básicos para realizar el análisis de vibraciones como los acelerómetros y sensor óptico para la desalineación, además de que los bancos no se encontraban en total funcionamiento.

Para la propuesta final se indagó diferentes tipos de bancos de vibraciones entre los cuales encontramos bancos completos es decir con todos los componentes necesarios para realizar el análisis de vibraciones también se observaron analizadores portátiles, pero al tener la caracterización del banco que se optó por el de menor costo dándole prioridad a la reutilización de los componentes del banco.

En respuesta a la pregunta del planteamiento del problema se comprobó la necesidad de banco de vibraciones, siendo este importante para los estudiantes de Ingeniería Mecatrónica ya que gran porcentaje de los egresados se encuentran trabajando en el área de mantenimiento.

Durante la investigación se observó que el uso de los motores AC era más que los DC, debido a que los motores DC tienen un alto costo y su reparación es mucho más costosa que los motores AC por lo tanto para la propuesta se tuvo en cuenta reutilizar los motores que se encuentran en los bancos de la universidad.

Recomendaciones

De manera general se recomienda continuar con el trabajo realizado en la materia de IMOSI de reparar y habilitar el banco de balanceo dinámico en un plano, para poder tener en funcionamiento el banco de balanceo dinámico en dos planos y el banco de fallas en rodamiento.

Para expandir el alcance de la utilidad del banco de pruebas, es recomendable adicionar un reductor de velocidad o un motor con velocidad variable con la intención de realizar pruebas a diferentes velocidades de funcionamiento y así poder identificar cambios en la amplitud de las señales temporales capturadas que sugieran la existencia de una velocidad crítica o frecuencias de resonancia excitadas en el banco de pruebas.

Se sugiere continuar con las investigaciones del uso de métodos inteligentes como los usados por Escruceria y Rojas en su tesis titulada “DISEÑO DE UN SISTEMA DE DETECCIÓN Y DIAGNÓSTICO DE FALLAS (SDDF) POR ANÁLISIS DE VIBRACIÓN EN MÁQUINAS ROTATIVAS (AVMR) EN CASOS DE ESTUDIO DE DIFERENTES PATRONES DE FALLAS Y PRODUCCIÓN DE UN PROPUESTA METODOLÓGICA PARA SDDF POR AVMR”, así reforzando también temática de la materia Control Inteligente.

Bibliografías

- [1] T. Document *et al.*, “ISO 14224 Petroleum and natural gas industries — Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment,” no. 40, 2005, [Online]. Available: https://www.google.com.co/search?newwindow=1&q=control+de+acceso&oq=control+de+acceso&gs_l=serp.3..0l10.690993.695543.0.695763.20.14.2.4.4.0.260.1813.2j8j3.13.0....0...1c.1.26.serp..5.15.1125.XMNw-g33y7c
- [2] F. Cira, “Detection of eccentricity fault based on vibration in the PMSM,” *Results Phys.*, vol. 10, no. July, pp. 760–765, 2018, doi: 10.1016/j.rinp.2018.06.044.
- [3] J. A. Jara Jimbo and J. G. Sinchi Vivar, “Diseño y construcción de un banco didáctico para la medición de vibraciones mecánicas en los Laboratorios de Instrumentación de la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca,” 2012, Accessed: Oct. 12, 2022. [Online]. Available: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/2655>
- [4] S. G. Garrido, *Organización y gestión integral de mantenimiento.*, Ediciones. 2010.
- [5] Cacuango, “Diseñar Una Estrategia Basada En La Título: Metodología Tpm Para Reducir Costos De Mantenimiento Correctivo Y Preventivo En La Empresa Dulcenac S.a.,” *Univ. Guayaquil*, pp. 1–94, 2021, [Online]. Available: [http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/56647/1/CACUANGO MAJI MARIO ENRIQUE.pdf](http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/56647/1/CACUANGO%20MAJI%20MARIO%20ENRIQUE.pdf)
- [6] International Organization for Standardization, “NTP-ISO 55000:2015. Gestión de activos. Aspectos generales, principios y terminología,” vol. 2014, no. Lima 27, pp. 1–29, 2015.
- [7] F. P. Oliveira and C. R. C. Lima, “Análise da Função Manutenção como Estratégia Empresarial: Estrutura, Ferramentas e Impacto das Decisões,” *Rev. Ciência Tecnol.*, vol. 17, no. 34, pp. 65–76, 2014, doi: 10.15600/2238-1252/rct.v17n34p65-76.
- [8] C. González, “Diseño del Plan de Mantenimiento correctivo en la empresa de servicios , Coomeva Servicios Administrativos Trabajo de grado para optar por el Tí,” pp. 1–64, 2018, [Online]. Available: <https://repository.unad.edu.co/jspui/bitstream/10596/17919/3/16379026.pdf>
- [9] F. Híbrido, C. O. N. Base, E. N. Políticas, D. R. Tasé-velázquez, C. R. Camello-lima, and L. Hernández-mastrapa, “on Corporate and Production Policies,” no. July, 2020.

- [10] "Introduction to Predictive Maintenance with MATLAB".
- [11] T. Tinga, "Principles of Loads and Failure Mechanisms," 2013, doi: 10.1007/978-1-4471-4917-0.
- [12] J. M. Flynn, A. Shokrani, S. T. Newman, and V. Dhokia, "Hybrid additive and subtractive machine tools - Research and industrial developments," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 101, pp. 79–101, 2016, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2015.11.007.
- [13] F. Pérez, *CONCEPTOS GENERALES EN LA GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO INDUSTRIAL*. 2017.
- [14] J. D. Roso Sierra, "Planeación y desarrollo del mantenimiento correctivo y preventivo de las máquinas amarillas de la empresa Obrecol S.A.S.," 2022.
- [15] A. A. RIVEROS VARAS, "IMPLEMENTACION DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO PARA EQUIPOS MINEROS BOOMER 282 EPIROC INTERIOR MINA," 2022.
- [16] M. L. Chimborazo Toapanta, "DESARROLLO DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO PARA EL SISTEMA DE TRANSPORTE POR CANGILONES EN LA EMPRESA NUTRISALMINSA S.A. DE LA CIUDAD DE AMBATO," 2022.
- [17] L. Pacheco, "Propuesta de implementación de un sistema de gestión de mantenimiento preventivo basado en RCM para la reducción de fallas de la maquinaria de la empresa HYDRO PÁTAPO," 2018, [Online]. Available: <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/182>
- [18] A. N. Mora Pin and S. A. Alfonso Molina, "APLICATIVO MÓVIL PARA LA GESTION DEL MANTENIMIENTO PREDICTIVO, DE LAS BOMBAS DE AGUA, EN INSTALACIONES DE CULTIVO HIDROPÓNICO DE GRAN TAMAÑO.," 2020.
- [19] ISO, "Iso 17359:2018," *61010-1 © Iec2001*, vol. 2018, p. 13, 2018.
- [20] D. J. Sánchez Martín, "Mantenimiento Predictivo Machine Learning para la detección automatizada de fallos," p. 33, 2021, [Online]. Available: Machine Learning para la detección automatizada de fallos
- [21] P. E. Spector, S. Fox, L. M. Penney, K. Bruursema, A. Goh, and S. Kessler, "The dimensionality of counterproductivity: Are all counterproductive behaviors created equal?," *J. Vocat. Behav.*, vol. 68, no. 3, pp. 446–460, Jun. 2006, doi: 10.1016/J.JVB.2005.10.005.

- [22] B. Christiansen, "An Introduction to Predictive Maintenance (PdM) with CMMS | by Bryan Christiansen | Medium." <https://medium.com/@bryanc.limble/an-introduction-to-predictive-maintenance-pdm-with-cmms-c1dcec1e0284> (accessed Nov. 23, 2022).
- [23] W. J. Lee, H. Wu, H. Yun, H. Kim, M. B. G. Jun, and J. W. Sutherland, "Predictive maintenance of machine tool systems using artificial intelligence techniques applied to machine condition data," *Procedia CIRP*, vol. 80, pp. 506–511, 2019, doi: 10.1016/J.PROCIR.2018.12.019.
- [24] D. Moreno Moreno, "EN GRÚA DIGITALIZACIÓN Y MANTENIMIENTO PREDICTIVO EN GRÚAS TORRE."
- [25] R. A. M. Ferreira, B. P. A. Silva, G. G. D. Teixeira, R. M. Andrade, and M. P. Porto, "Uncertainty analysis applied to electrical components diagnosis by infrared thermography," *Measurement*, vol. 132, pp. 263–271, Jan. 2019, doi: 10.1016/J.MEASUREMENT.2018.09.036.
- [26] B. Ruben Ivan Carvallo Cumpa Bach Ernesto Ronald Nieto Narciso Asesor and M. Carlos Ramos Gonzáles Lima -Perú, "Termografía infrarroja como herramienta para el mantenimiento predictivo de tableros eléctricos en la empresa AEI Engineers S.A.C.," Universidad Privada del Norte, 2020. Accessed: Nov. 24, 2022. [Online]. Available: <https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/26027>
- [27] E. García Nevado, "Termografía del cañón urbano: uso de la perspectiva para una evaluación térmica global de la calle," *TDX (Tesis Dr. en Xarxa)*, 2019, [Online]. Available: <http://www.tesisenred.net/handle/10803/666702>
- [28] H. R. Bances Vidaurre, "Mantenimiento predictivo mediante la técnica de termografía para optimizar el funcionamiento del sistema eléctrico Tierras Nuevas en empresa Coelvisac," 2020.
- [29] F. José, A. Viseras, R. María, C. Morales, F. Javier, and R. Rodríguez, "Implementación del mantenimiento centrado en la fiabilidad (RCM) en los motores de las lanchas de instrucción.," Centro Universitario de la Defensa de Marín, 2019. Accessed: Nov. 25, 2022. [Online]. Available: <http://calderon.cud.uvigo.es/handle/123456789/262>
- [30] P. P. CÁRDENAS JARRIN, A. H. CEVALLOS MÁRQUEZ, and J. C. MOYANO ROMERO, "Análisis De Vibraciones En Motores De Combustión Interna Por Medio De Ultrasonido," *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 2013.
- [31] C. MAFLA, C. CASTEJON, and H. RUBIO, "MANTENIMIENTO PREDICTIVO EN TRACTORES AGRÍCOLAS. PROPUESTA DE

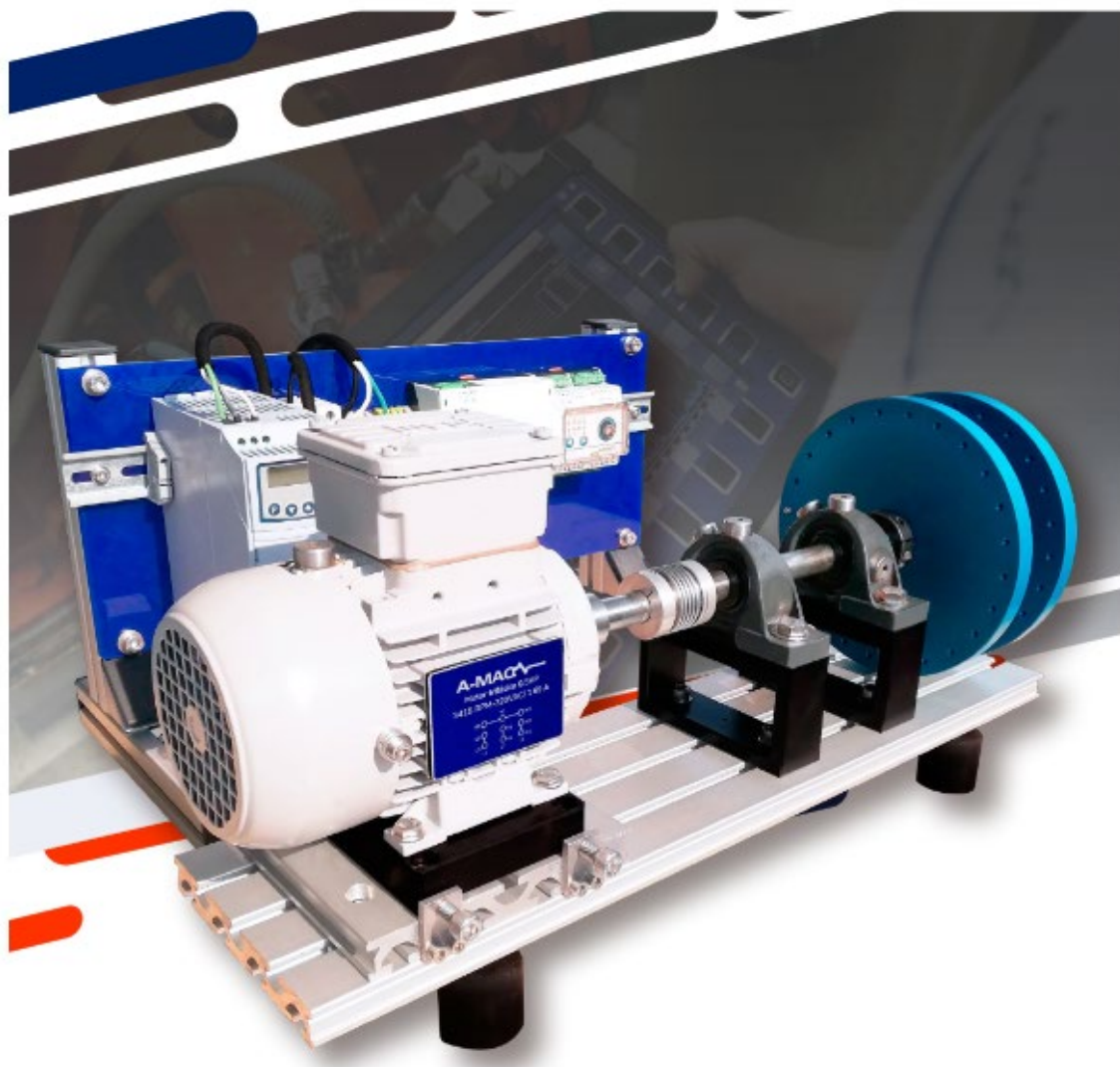
METODOLOGÍA ORIENTADA AL MANTENIMIENTO CONECTADO,” 2022.

- [32] J. A. CACUANGO CARANQUI and J. ULCUANGO ULCUANGO, “DISEÑO DE UN SISTEMA DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO AUTOMOTRIZ BASADO EN LA INDUSTRIA 4.0.,” 2021.
- [33] B. D. Soto, D. Cristofer, A. Jesus, and S. Mendoza, “Implementación de un mantenimiento basado en el análisis de aceite para incrementar la disponibilidad de una excavadora Cat 336 de GYM - Tacna,” Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, 2019. Accessed: Nov. 25, 2022. [Online]. Available: <http://repositorio.unprg.edu.pe/handle/20.500.12893/4472>
- [34] P. Martínez and R. Casas Nebra, “Trabajo Fin de Máster Mantenimiento predictivo; estado del arte y desarrollo de herramienta para monitorización. Autor/es,” 2019.
- [35] E. R. Herrera Alvarado, “Control y monitoreo de cargas inductivas y resistivas para un mantenimiento predictivo, utilizando un sistema SCADA mediante Ignition.,” 2018, [Online]. Available: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/9217>
- [36] G. Santamaría, “Análisis espectral de señales para la detección de fallos de motores de inducción,” 2017, Accessed: Nov. 25, 2022. [Online]. Available: <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/24137>
- [37] D. F. ALBARADO MERCHÁN, “ELABORACIÓN DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO DE LOS EQUIPOS CRÍTICOS DE LAS PRINCIPALES SUBESTACIONES DE LA EMPRESA DE ENERGÍA DE BOYACÁ S.A. E.S.P. APLICADO POR LA EMPRESA ASISTENCIA TÉCNICA INDUSTRIAL LTDA.,” 2017.
- [38] C. D. Espinoza Ronquillo, “Repotenciación del mantenimiento predictivo basado en el análisis de vibración enfocado a equipos rotatorios usados para el proceso de producción de una planta química ubicada en Guayaquil-Ecuador,” 2019.
- [39] “¿Qué son las vibraciones? Significado, Unidades de Medida y Valores.” <https://midebien.com/que-son-las-vibraciones/> (accessed Oct. 10, 2022).
- [40] A. A. Aroca Delhi, “Análisis de vibraciones y alineación en motores eléctricos asíncronos trifásicos.,” Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, 2018. Accessed: Oct. 10, 2022. [Online]. Available: <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/11392>
- [41] D. E. Ensayos, V. Para, D. De Fallas, P. M. Paredes, L. Asesor, and J. A. O. Yume, “Modelado, simulación e implementación de módulo de ensayos

- vibracionales para detección de fallas en maquinaria rotativa para instrucción universitaria,” Universidad César Vallejo, 2018. Accessed: Oct. 12, 2022. [Online]. Available: <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/35224>
- [42] D. J. Guanaga Pujos and K. A. Pilco García, “Diseño y construcción de un banco de pruebas para el diagnóstico de fallas en sistemas mecánicos por desalineamientos en acoples flexibles mediante análisis comparativo de espectros de vibración,” Jul. 2021, Accessed: Oct. 10, 2022. [Online]. Available: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/15147>
- [43] J. Muriel Hoyos and C. Herrera Arcila, “Banco de Pruebas para el Análisis de Vibraciones en Maquinaria,” 2021.
- [44] “¿Cómo afecta el desbalanceo en la confiabilidad de una máquina rotante? - CBM CONNECT® en Español.” <https://esp.cbmconnect.com/como-afecta-el-desbalanceo-en-la-confiabilidad-de-una-maquina-rotante/> (accessed Oct. 12, 2022).
- [45] “Frecuencias propias de un engranaje | Power-MI.” <https://power-mi.com/es/content/frecuencias-propias-de-un-engranaje> (accessed Nov. 26, 2022).
- [46] J. E. GONZÁLEZ TORRES, “DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITOREO DE LA CONDICIÓN MEDIANTE ANÁLISIS DE VIBRACIONES EN CENTRAL MICROHIDRÁULICA,” 2013.
- [47] A. Maquinaria, “Tutorial de vibraciones para mantenimiento mecánico realizado por a-maq s.a. análisis de maquinaria,” 2005.
- [48] a. . Fallis, “Iso 10816-3,” *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 53, pp. 1689–1699, 2013.
- [49] “ISO 13373 INTERNATIONAL STANDARD Condition monitoring and diagnostics processing , communication and iTeh STANDARD PREVIEW iTeh STANDARD PREVIEW,” vol. 2015, 2015.
- [50] M. Mercante, H. Farfan, and D. Paul, “Análisis del mantenimiento predictivo usando la técnica del análisis de vibraciones según la perspectiva de los oficiales de máquinas que navegan en buques mercantes de bandera peruana, 2020.” *Esc. Nac. Mar. Merc. “Almirante Miguel Grau,”* 2020, Accessed: Nov. 27, 2022. [Online]. Available: <http://repositorio.enamm.edu.pe/handle/ENAMM/215>
- [51] J. S. ROJAS ESTAVA and S. ESCRUCERIA DEL PINO, “DISEÑO DE UN SISTEMA DE DETECCIÓN Y DIAGNÓSTICO DE FALLAS (SDDF) POR ANÁLISIS DE VIBRACIÓN EN MÁQUINAS ROTATIVAS (AVMR) EN

CASOS DE ESTUDIO DE DIFERENTES PATRONES DE FALLAS Y PRODUCCIÓN DE UN PROPUESTA METODOLÓGICA PARA SDDF POR AVMR,” 2013.

[52] INDCO, “BANCOS DE VIBRACIONES MECANICAS - INDCO LTDA.” 2010.



ROTOR-MAQ Compacto

Máquina para Diagnóstico de Fallas
por Vibraciones



Beneficios



1 Compacta y portable

Dimensiones: 60 x 25 x 17 cms
Peso: 25 Kgs



2 Facilidad para conectividad eléctrica

Alimentación: 110 - 220 VAC



3 Control de máquina portable

Estructura modular con espacio para soportar un PLC y/o sistemas de monitoreo de vibraciones como A-TRANSMITTER de A-MAQ



4 Para monitoreo de vibraciones

Puntos de medición en acero inoxidable magnético



5 Rápido intercambio de piezas y sin golpes

Múltiples repuestos para cambio por deslizamiento. Apriete con tornillos



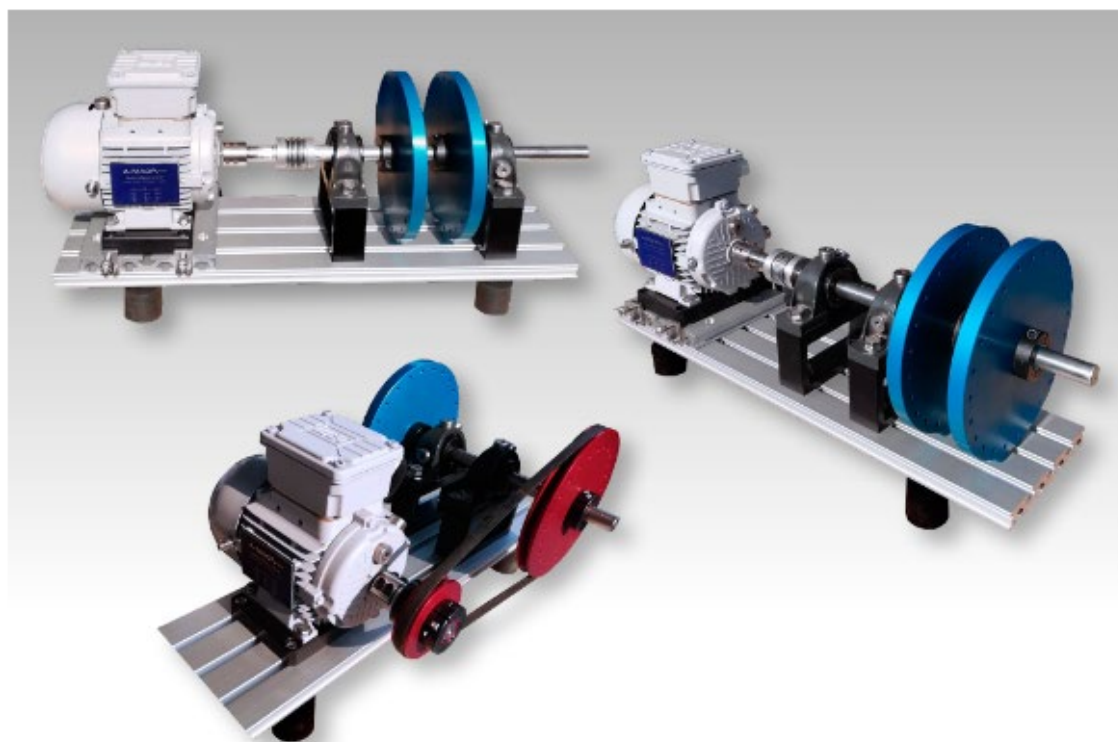
ROTOR-MAQ Compacto

Es una máquina real que nos permite experimentar con sus mejores y peores condiciones para aprender a predecir las fallas de las máquinas de la industria.

Diseñada para un ensamble fácil y práctico e inspirada en la estrategia educativa del "aprender haciendo", que nos permite construir conocimiento en las técnicas predictivas o de monitoreo de condición.

Es fabricada utilizando los mejores materiales, mecanizados y acabados, garantizando gran calidad, durabilidad, fácil montaje y desmontaje, así como excelente repetibilidad de las prácticas a desarrollar en ella

Múltiples configuraciones, para múltiples alcances



Lista de componentes del ROTOR-MAQ compacto

Componente	Cantidad
Motor trifásico de 0.5 HP, 3600 RPM	1
Base para alineación horizontal	1
Acople flexible y rígido	1
Eje en acero inoxidable	1
Discos para balanceo	2
Chumaceras y rodamientos (1 con falla mixta)	3
Soportes para chumaceras	2
Poleas (conductora y conducida) + banda en V	2
Variador de velocidad alimentado a 110 VAC con soporte para mesa	1
Base de máquina (60cm de largo x 15cm de ancho aprox.)	1
Bases antivibratorias	6
Cable de alimentación para el variador y motor	1
Llaves para apriete de tornillos de la máquina	1
Maleta para transporte	1



Calle 26 # 81 - 51
Medellín - Colombia



(574) 341 7217



<https://a-maq.com/>



contacto@a-maq.com

Anexo B



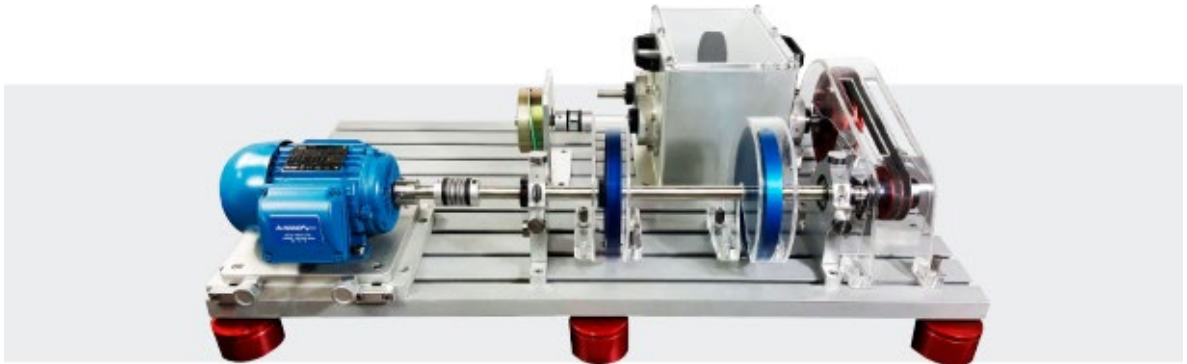
ROTOR-MAQ

Máquina para Diagnóstico de Fallas por Vibraciones

A-MAQ 



“El análisis de vibraciones en maquinaria rotativa, es una de las técnicas predictivas de mayor alcance para conocer el **estado dinámico-mecánico de las máquinas**. Su uso en la industria es cada vez más popular y la tecnología para la toma de datos es cada vez más accesible.”



EL **ROTOR-MAQ** es una excelente herramienta modular desarrollada por **A-MAQ S.A.**, para la comprensión fácil y práctica de esta variable.

Es fabricada **utilizando los mejores materiales**, mecanizados y acabados, garantizando gran calidad, durabilidad, fácil montaje y desmontaje, así como excelente repetibilidad de las prácticas a desarrollar en ella.



MÚLTIPLES CONFIGURACIONES, PARA MÚLTIPLES ALCANCES:

Configuración para prácticas de desbalanceo y desalineación

A continuación algunas de las prácticas que pueden realizarse con esta configuración:

-  Introducción a la medición de vibraciones.
-  Interpretación de las formas de onda y espectros de vibración.
-  Posicionamiento de sensores de vibración.
-  Definición de los puntos de medición.
-  Desbalanceo en 1 y 2 planos.
-  Desbalanceo estático y dinámico.
-  Desalineamiento entre ejes: Paralelo, angular y mixto.
-  Cambios en la respuesta del eje, ante el desplazamiento axial de rotores y soportes de rodamiento.



Configuración para prácticas de poleas y fallas en rodamientos

A continuación algunas de las prácticas que pueden realizarse con esta configuración:

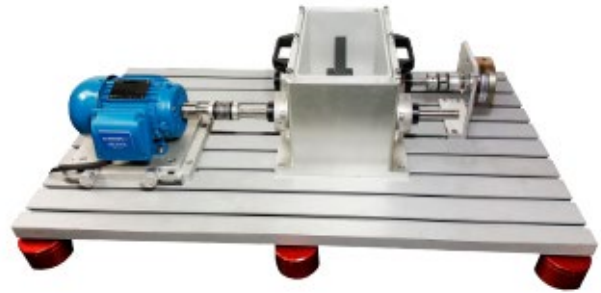
-  Influencia de la velocidad en la respuesta vibratoria.
-  Influencia de la tensión de la banda en la respuesta vibratoria.
-  Desalineación de poleas.
-  Comparación entre banda en buen estado y banda dañada.
-  Respuesta vibratoria de un rodamiento con y sin carga radial (por polea y banda con tensión modulable).
-  Diagnóstico de rodamientos con: falla en pista interna, externa, bolas y falla mixta.



Configuración para prácticas en cajas de engranajes

A continuación algunas de las prácticas que pueden realizarse con esta configuración:

-  Influencia del tipo de engranaje (recto o helicoidal) en la respuesta vibratoria.
-  Identificación por vibraciones de engranaje con diente dañado.
-  Influencia de la lubricación.
-  Influencia de la carga (freno) en la respuesta vibratoria.



LISTA DE COMPONENTES DE CONFIGURACIÓN BÁSICA DEL ROTOR-MAQ

COMPONENTES	CANTIDAD
Motor trifásico 1 HP, 3600 RPM.	1
Base escualizable para alineamiento y soporte del motor.	1
Extensión de eje de motor.	1
Acoples flexibles con mecanismo tipo abrazadera.	2
Eje largo en acero inoxidable para discos de balanceo.	1
Chumaceras bipartidas para soporte de rodamientos.	2
Discos de balanceo con abrazaderas.	2
Poleas de doble canal en V (1 de ellas de diámetro superior a la otra).	2
Bandas en V	2
Mecanismo tensor de bandas.	1
Caja metálica (5 caras) con tapa de acrílico para soportar ejes, aceite y engranajes.	1
Engranajes de diente helicoidal (1 con falla en diente, 2 sin falla inducida (1 de diámetro mayor).	3
Ejes en acero inoxidable para soportar engranajes.	1
Freno electromagnético soportado en caja metálica.	1
Rodamientos de 1 hilera de bolas con las siguientes fallas inducidas: pista externa, pista interna, bolas, mixto y sin falla.	6
Rodamientos de doble hilera de bolas asociados a la caja reductora.	4
Placa soporte de la máquina en duraluminio.	1
Soportes antivibratorios.	6
Variador de velocidad para motor de 1 HP.	1
PLC con pantalla táctil de 3.5" para el control de la máquina.	1
Caja de paso o tablero para soporte de los equipos de potencia y control de la máquina.	1
Tornillería, tuercas y arandelas en acero inoxidable para el acople de todos los mecanismos.	1
Torquímetro.	1
Kit de llaves y accesorios para el montaje de la máquina.	1
Guarda en acrílico para los discos de balanceo y poleas.	3
Maletas plásticas, para resguardar los elementos de máquina.	1



PRINCIPAL MEDELLÍN

📍 Calle 26 #81-51, Belén la palma.

☎ (574) 341 7217 – 256 6767

✉ info@a-maq.com

🌐 a-maq.com

SEDE BOGOTÁ

📍 Calle 106 # 53-56 Oficina 610 Edificio Grupo 7 Torre 106 (Bogotá).

☎ (571) 533 1454 – (571) 533 0865

✉ info@a-maq.com

🌐 a-maq.com

A-MAQ 

Anexo C

www.cemb.com

PORTABLE INSTRUMENT

N330


2,3
VIBROMETER


FFT


ISO
SPEED ANALYSIS


CBA


SDO


BALANCING


MACHINE

VIBROMETER

MACHINE ANALYSER

SPECTRUM ANALYSER

BALANCER 1-2 PLANES

NEW



27/11/2019 - 13:40

ROTORS BALANCING

VIBRATION

A: 1.16 mm/s RMS @ 286°

B: 0.31 mm/s RMS @ 292°

SPEED 1530rpm

BACK **NEXT**

CORRECTION RUN
OK TO START MEASUREMENT

CEMB
N 3 3 0



CEMB
BALANCING MACHINES

N330 PORTABLE INSTRUMENT



STANDARD ACCESSORIES

- No.1 accelerometer transducer 100mV/g
- No.1 magnetic base Ø 25mm
- No.1 probe
- No.1 transducer connection cable L.2m
- No.1 Photocell complete with upright and magnetic base
- Set of angle rules
- No.1 USB stick with manuals
- Battery charger with multiplug adapters
- Carrying case
- Micro USB Cable

OPTIONAL ACCESSORIES

- No.1 Connection cable 5m for transducer
- N.1 Connection cable 5m for photocell
- No.1 Extension cable 10m for transducer
- No.1 Extension cable 10m for photocell



The Smart solution for vibration analysis and balancing

Intuitive functions under full control

10 KHz Vibrometer and Machine Analyzer with static and dynamic balancing function

- **4.3" color graphic display**
Very high luminosity and contrast for sunlight use
Wide view angle
- **Enhanced click keyboard**
Optimal tactile feedback
Designed for gloves use
- **Heavy duty and metallic connectors**
- **Fast measure**
- **Huge memory space**
14.8 GByte, expandable to 128 GByte
1000+ measures for each type
- **Easy reporting**
Screenshot display capture and save
Smart route data store
Output file: JSON format - Micro USB 2.0 data port



VIBROMETER & TACHO



- Big readable characters
- Overall with main peak
- 1x fundamental with phase
- Speed rotation

HIGH RESOLUTION FFT



- Graphic zoom
- Peak cursors
- Autoscale feature
- List of main peaks

SMART ANALYSIS



- Machine troubleshoot at a glance
- Vibration root cause identification
- Step by step according ISO10816-3
- Automatic speed detection

GRINDING WHEEL BALANCING



- Grinding balancing with 2 or 3 counterweights
- Graphic interface with real time correction
- Balancing Report

ROTORS BALANCING



- Static/Dynamic balancing (1-2 planes)
- Check of trial weight effect
- Balancing tolerance according to ISO21940-11
- Estimate of trial weight calculation in grams
- Balancing by addition or removal mass

ANGULAR SPLIT



- Split angle calculation:
 - Split weights
 - Split on fixed available angular locations (from 1 up to 24)

TECHNICAL DATA

GENERAL CHARACTERISTICS

- Display: 4,3" colour LED-backlit TFT LCD (480 x 272 pixel)
- New EasyClick tactile keyboard with embossed keys
- Internal memory: 14,8 Gb (expandable to 128 Gb)
- Multi languages user interface

MEASUREMENT TYPES

- Effective value (RMS)
- Peak value (Pk)
- Peak-to-peak value (PP)

MEASURING PERFORMANCE

- Bandwidth: 1-10 KHz
- FFT Resolution: Max 3200 lines
- Tacho: Up to 250000 rpm

UNITS OF MEASUREMENT

- Acceleration: [g]
- Velocity: [mm/s] or [inch/s]
- Displacement: [µm] or [mils]
- Frequency: [Hz] or [Cpm]

INPUT

- 1 measuring channel (for vibrometer function) IEPE sensor, accelerometer and velomitor.
With a specify cable pluggable on a BNC for read any dynamic signal max. 10V PkPk
- 2 channels specify for balancing (1-2 planes)
- 1 photocell channel (velocity and angle reference)
- 1 MicroUSB 2.0 port for data transfer
- 1 jack plug for battery charger

AMBIENT

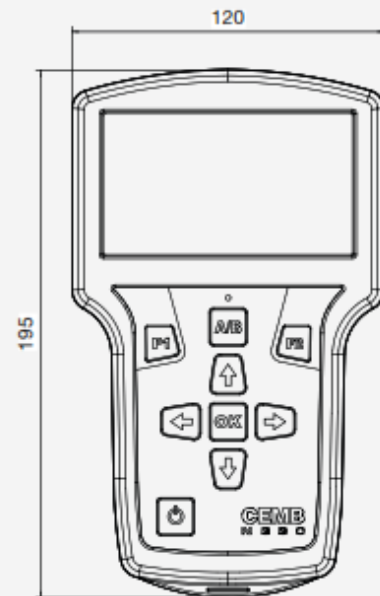
- Temperature: from -20° to +50° C
- Air humidity: from 0 to 95% without condensate
- Protection: IP54

POWER SUPPLY

- Long Life Battery: > 8 hours based on typical use
- Charging time: 2,5 hours for 80% recharge
4 hours for 100% recharge
- Rechargeable 3100 mAh Lithium battery
- Power supply-battery charger for 100-240 V, 50/60 Hz (24 V, 1.5 A)

CARRYING CASE DIMENSIONS AND WEIGHT

- Approx. 370(L) x 300 (H) x 115(D) 1800 g



CEMB S.p.A. - Via Risorgimento, 9
23826 Mandello del Lario (LC) - Italy
www.cemb.com



Vibration analysis division:
Phone +39 0341 706111
e-mail: stm@cemb.com

Tutti i dati e le caratteristiche menzionati in questo catalogo sono a titolo indicativo e non costituiscono nessun impegno per la nostra Società che si riserva il diritto di apportare senza alcun preavviso, tutte le variazioni che riterrà opportune.

ASME01/10

Anexo D

PORTABLE EQUIPMENT

N600

- Multipurpose vibrometer
- Spectrum analyser
- Data collector
- Balancing machine



CEMB
BALANCING MACHINES

N600

CEMB – THE SOLUTION FOR ANALYSIS AND BALANCING FOR MORE THAN 60 YEARS

CEMB's range of portable equipment for vibration measurement and analysis, balancing and predictive maintenance has been enhanced with the new N600 instrument.

Equipped with an ample, backlit, high resolution LCD colour screen, N600 can be used in all types of lighting conditions.

Ease of use, calculation power and intuitive methods for the setting/presentation of measurements and graphs are the main features of this instrument.

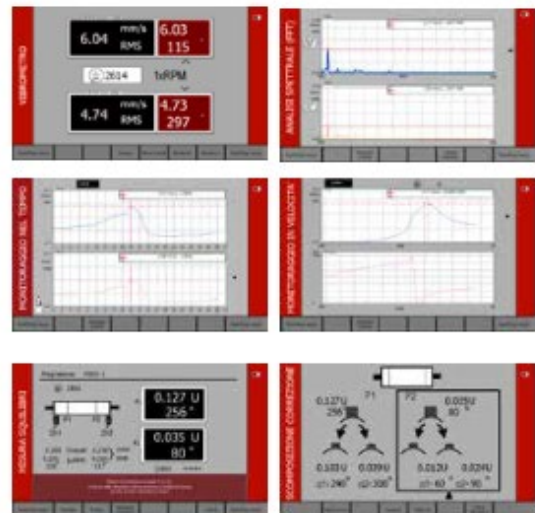
The analysis functions provide the information needed for machine diagnosis and diagnosis of the condition of the bearings so the most appropriate maintenance work can be identified.

The balancing function can be used to balance any type of rotating body on one or more plane irrespective of size and weight.

The vibration trend over time, spectral analysis and Bode plot, which are essential tools for defining the corrective action needed with extreme precision, are all visible directly on the screen.

All of the readings taken can be saved in a database using sophisticated software for effective and rational organisation of predictive maintenance.

The equipment is supplied with standard accessories (2 accelerometers with a heavy-duty spiral cable, Hi-Speed 250,000 cpm photocell, USB stick, angle rule) sufficient for performing all of the main functions. Various optional accessories are also available (other types of sensors, extensions, Bluetooth printer) for when the equipment needs to be used in special conditions.



ADS ADVANCED DIAGNOSTIC SOFTWARE

The software package, which can be installed on a PC, can perform data acquisition route creation (Route Manager) functions and provides diagnostics tools (Advanced Diagnostic Software). Three different levels are available to meet all requirements: storage, detailed analysis, diagnostics, measurement comparisons, trends, spectrums, orbits.

LEVEL 1 BASIC

- Multilingual interface
- Trend data
- Route management
- Data export option
- Zoom

LEVEL 2 STANDARD

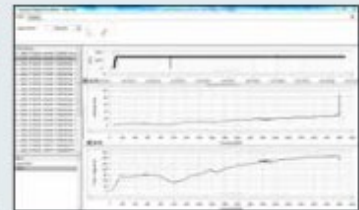
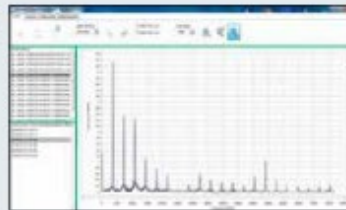
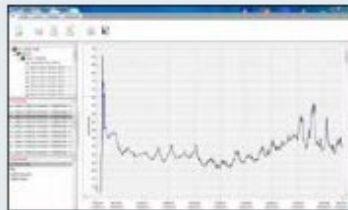
All Level 1 functions plus:

- FFT analysis
- Harmonic cursor
- List of peak values
- Waveform

LEVEL 3 EXPERT

All Level 1 and 2 functions plus:

- Waterfall analysis
- Orbit analysis
- Bode plot
- Nyquist plot
- Statistical analysis



N600 VERSATILE AND COMPLETE

STANDARD ACCESSORIES:

- No. 2 accelerometer transducers 100mV/g
- No. 2 transducer connection cables L 2.5 m
- No. 1 heavy duty spiral cable L 2 m
- No. 2 magnetic bases Ø 25 mm
- No. 2 probes
- No. 1 250,000 Cpm Hi-speed, laser photocell complete with upright and magnetic base
- No. 1 roll of reflecting tape
- No. 1 USB stick for data transfer
- Angle rule
- Battery charger
- Universal plug
- Case complete with carry strap
- Manual

OPTIONAL ACCESSORIES:

- Bluetooth printer
- Protective cover
- Velocity transducer complete with lead and magnetic base
- Proximity sensor complete with upright, lead and magnetic base
- Connection cable for transducers L 5 m
- 10 m-long extension cable for transducers
- 10 m-long extension cable for photocell
- CEMB ADS software for data storage and management



TECHNICAL DATA

FUNCTIONS:

- Measurement of the overall vibration value (acceleration, velocity, displacement)
- Vibration phase measurement
- Analysis of vibration in the frequency range
- Monitoring overall vibration in relation to time or velocity (Bode plot)
- Balancing of rotating bodies in operating conditions on 1 or 2 planes
- Waveform

MEASUREMENT TYPES

- Effective value (RMS)
- Peak value (Pk)
- Peak-to-peak value (PP)

UNITS OF MEASUREMENT

- Acceleration: [g]
- Velocity: [mm/s] or [inch/s]
- Displacement: [μ m] or [mils]
- Frequency: [Hz] or [Cpm]

INPUT

- 2 Independent and simultaneous measuring channels (accelerometer, velocimeter, non-contact, any signal max. 5V-PP)
- 1 photocell channel (velocity and angle reference)
- 2 USB ports for data transfer

VIBROMETER FUNCTION

- Measurement of the overall vibration value in predefined frequency bands (10-1000Hz; 3-300Hz; 10-10000Hz) or bands defined by the user (within the range of 3-20000Hz)
- Measurement of 1x fundamental vibration value and phase
- Measurement of rotating body velocity

FFT FUNCTION (ANALYSIS IN FREQUENCY)

- FFT analysis (manual/trigger)
- Maximum settable frequency (25; 100; 500; 1000Hz; 2.5; 5; 10; 15kHz)
- Resolution (100; 200; 400; 800; 1600; 3200 lines)
- Number of averages: from 1 to 16
- List of main peak values

MONITOR - DATA LOGGER FUNCTIONS

- Recording and display of overall vibration trend over time
- Storage and display of vibration trend and phase when rotation velocity changes.

BALANCING FUNCTION

- Number of correction planes: from 1 to 2
- Graphic indicator of measurement stability
- Balancing procedure, guided step by step, with option for editing and intermediate changes
- Vectorial breakdown of the unbalance
- Correction by adding or removing material

GENERAL CHARACTERISTICS

- Display: 7" colour LED-backlit TFT LCD
- A/D converter: 24 bit resolution
- Dimensions: approx. 225 x 200 x 50 mm
- Weight: 1.4 kg

OPERATING CONDITIONS

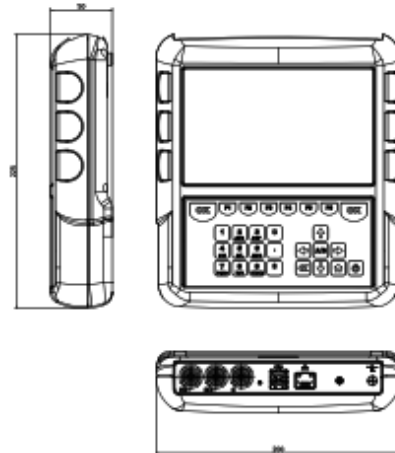
- Temperature: from -10° to +50° C
- Air humidity: from 0 to 95% without condensate

POWER SUPPLY

- Rechargeable 6Ah Lithium battery
- Charging time: < 5 hours (when battery is fully discharged)
- Power supply-battery charger for 100-240 V, 50/60 Hz (24 V, 1.5 A)
- Battery life: > 8 hours based on typical use



ITALIAN HEART:
All of the design
and production
is strictly MADE IN ITALY



CEMB S.p.A.
Via Risorgimento, 9
23826 MANDELLO DEL LARIO (LC) Italy
www.cemb.com

Vibration analysis division:
phone +39 0341 706111
fax +39 0341 706299
e-mail: strn@cemb.com

All of the data and characteristics mentioned in this catalogue are purely indicative and do not constitute a commitment for our company, which reserves the right to make any changes it may deem necessary without any prior warning.

ASME120 01 / 1-4