



UNIVERSIDAD ANDINA
NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS PURAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECATRÓNICA



**IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MONITOREO DE
VIBRACIONES EN UNA MAQUINA DESPEDRADORA
DE QUINUA**

TESIS PRESENTADA POR:

Bach. JIMMY ALEXANDER MAMANI CHARCA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO MECATRÓNICO

JULIACA – PERÚ

2025



UNIVERSIDAD ANDINA

NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ

FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS PURAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MONITOREO DE VIBRACIONES EN UNA MAQUINA DESPEDRADORA DE QUINUA

TESIS PRESENTADA POR:

Bach. JIMMY ALEXANDER MAMANI CHARCA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO MECATRÓNICO

APROBADA POR EL JURADO REVISOR:

PRESIDENTE

:

Mgr. SALVADOR TEODORO VALDIVIA CARDENAS

PRIMER MIEMBRO

:

M. Sc. ABELARDO LEÓN MIRANDA

SEGUNDO MIEMBRO

:

Ing. ADWAR RANULFO SÁNCHEZ CARREÓN

ASESOR DE TESIS

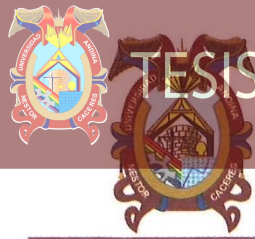
:

Dr. RICARDO ANIBAL MALDONADO MAMANI

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

:

TECNOLOGÍA DE LA INSTRUMENTACIÓN - P21

**RESOLUCIÓN DECANAL N° 690-2025-D-UI-FICP-UANCV**

Juliaca, 15 de julio del 2025

VISTO: El expediente N° 2025- CU-5387 presentado por el (la) Bachiller: **JIMMY ALEXANDER MAMANI CHARCA** estudiante de la Escuela Profesional de **Ingeniería Mecatrónica** de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras quien solicita **NOMINACIÓN DE JURADOS Y PROGRAMACIÓN DE FECHA Y HORA DE SUSTENTACIÓN**.

CONSIDERANDO:

Que, el (la) Bach. **JIMMY ALEXANDER MAMANI CHARCA**, quien solicita **NOMINACIÓN DE JURADOS Y PROGRAMACIÓN DE FECHA Y HORA DE SUSTENTACIÓN** de la Tesis Titulado: **IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MONITOREO DE VIBRACIONES EN UNA MAQUINA DESPEDRADORA DE QUINUA**, la misma que pertenece a la línea de investigación **TECNOLOGÍA DE LA INSTRUMENTACIÓN** para optar el Título Profesional de **Ingeniero Mecatrónico**.

Que, al haberse cumplido con los requisitos exigidos por el reglamento interno de trabajos de investigación conducente a grados y títulos mediante Resolución N° 0294-2023 UANCV-CU-R. y en concordancia con el dictamen de similitud.

De conformidad al Reglamento Interno de Trabajos de Investigación Conducente a Grados y Títulos aprobado con Resolución N° 0294-2023 UANCV-CU-R. y en merito al Art. 24, Art. 28 del reglamento, con fines de obtención de Grados Académicos y Títulos Profesionales, y en uso a las atribuciones, que le concede la ley Universitaria N° 30220, ley de creación de la UANCV N° 23738 y modificatoria N° 24661, y el Estatuto de la UANCV, el Decano y el Director de la Unidad de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras.

RESUELVE:

ARTÍCULO PRIMERO.- APROBAR, la **NOMINACIÓN DE JURADOS** integrado por los siguientes docentes:

- * **Presidente** : Mgtr. SALVADOR TEODORO VALDIVIA CARDENAS
- * **1er Miembro** : M.Sc. ABELARDO LEON MIRANDA
- * **2do Miembro** : Ing. ADWAR RANULFO SANCHEZ CARREÓN

ARTICULO SEGUNDO. – RECONOCER como asesor de la investigación (tesis) de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras al (a la) docente, **Dr. RICARDO ANIBAL MALDONADO MAMANI**.

ARTICULO TERCERO . – APROBAR, la **FECHA Y HORA DE SUSTENTACIÓN DE LA TESIS** de el (la) bachiller: **JIMMY ALEXANDER MAMANI CHARCA**; del informe final de la investigación (tesis) titulado: **IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MONITOREO DE VIBRACIONES EN UNA MAQUINA DESPEDRADORA DE QUINUA** para optar el Título Profesional de **Ingeniero Mecatrónico**. de acuerdo al siguiente detalle:

- * **FECHA** : jueves 24 de julio del 2025
- * **HORA** : 10:00 horas
- * **LUGAR** : Aula 204 - FICP

ARTÍCULO CUARTO.- DISPONER que, la Unidad de Investigación, Responsables del Comité de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras y el Director de la Escuela Profesional de **Ingeniería Mecatrónica** quedan encargados del cumplimiento de la presente Resolución.

Regístrese, Comuníquese, Archívese.

cc.
Archivo
interesado (a)

**RESOLUCIÓN DECANAL N° 1118-2024-D-UI-FICP-UANCV**

Juliaca, 26 de setiembre del 2024

VISTO: El expediente N° 2024-CU - 10645 por el señor (a): **JIMMY ALEXANDER MAMANI CHARCA** quien solicita **REVISIÓN DEL INFORME FINAL DE LA INVESTIGACIÓN (borrador de tesis)**, el PROVEIDO - N° 932- 2024-UI-FICP-UANCV/J, y la **FICHA DE OPINIÓN DEL INFORME FINAL DE LA INVESTIGACIÓN (BORRADOR DE TESIS)** formato N° 007- 2024 del integrante del comité de investigación **EPIM** de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras, según al reglamento interno de trabajos de investigación conducente a grados y títulos.

CONSIDERANDO:

Que, el señor (a): **JIMMY ALEXANDER MAMANI CHARCA**, ha presentado su informe final de la investigación (borrador de tesis) Titulado: **IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MONITOREO DE VIBRACIONES EN UNA MAQUINA DESPEDRADORA DE QUINUA**, para optar el Título Profesional de **Ingeniero Mecatrónico**.

Que, al haberse cumplido con los requisitos exigidos por el Reglamento Interno de Trabajo de Investigación Conducente a Grados y Títulos, con fines de obtención de Grados Académicos y Títulos Profesionales; el integrante del comité de investigación **Ing. Adwar Ranulfo Sanchez Carreón** de la Escuela Profesional de **Ingeniería Mecatrónica** de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras, emitió la ficha de opinión del informe final de la investigación (borrador de tesis) formato N° 007-2024 **aprobando** el informe final de la investigación (borrador de tesis) titulado: **IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MONITOREO DE VIBRACIONES EN UNA MAQUINA DESPEDRADORA DE QUINUA**, Correspondiente a la línea de investigación **TECNOLOGÍA DE LA INSTRUMENTACIÓN**.

Que, al haberse cumplido con los requisitos exigidos por el reglamento interno de trabajos de investigación conducentes a grados y títulos mediante Resolución N° 0294-2023 UANCV-CU-R. y estando a la opinión favorable del comité de investigación respecto al informe final de la investigación (borrador de tesis).

Estando, con la opinión favorable del Comité de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras y en concordancia al Reglamento Interno de Trabajos de Investigación Conducente a Grados y Títulos aprobado con Resolución N° 0294-2023 UANCV-CU-R. y en merito al Art. 27 del reglamento, con fines de obtención de Grados Académicos y Títulos Profesionales, y en uso a las atribuciones, que le concede la ley Universitaria N° 30220, ley de creación de la UANCV N° 23738 y modificatoria N° 24661, y el Estatuto de la UANCV, el Decano y el Director de la Unidad de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras.

RESUELVE:

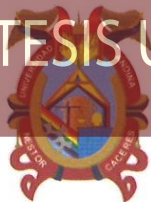
ARTÍCULO PRIMERO.- APROBAR, el **INFORME FINAL DE LA INVESTIGACIÓN (BORRADOR DE TESIS)**, para la **REVISIÓN DE SIMILITUD TURNITIN**, presentado por el señor (a): **JIMMY ALEXANDER MAMANI CHARCA**, para optar el Título Profesional de **Ingeniero Mecatrónico**, con el Tema Titulado: **IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MONITOREO DE VIBRACIONES EN UNA MAQUINA DESPEDRADORA DE QUINUA** correspondiente a la línea de investigación **TECNOLOGÍA DE LA INSTRUMENTACIÓN**, en virtud a los considerandos expuestos.

ARTÍCULO SEGUNDO.- RATIFICAR como **ASESOR DE INVESTIGACIÓN** al (a) la), **M.Sc. MARIO ALEJANDRO RAMOS HERRERA**.

ARTÍCULO TERCERO.- DISPONER que, la Unidad de Investigación, Responsables del Comité de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras y el Director de la Escuela Profesional de **Ingeniería Mecatrónica** quedan encargados del cumplimiento de la presente Resolución.

Regístrese, Comuníquese, Archívese.

UNIVERSIDAD ANDINA "NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ"
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS PURASDr. MILTHON QUISEP HUANCA
DECANO
CIP. 47790UNIVERSIDAD ANDINA "NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ"
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS PURAS
DIRECTOR
Dr. Efraín Parillo Sosa
DIRECTOR
UNIDAD DE INVESTIGACIÓNcc.
Archivo
interesado (a)



RESOLUCIÓN DECANAL N° 193-2024-D-UI-FICP-UANCV

Juliaca, 23 de abril del 2024

VISTO: El expediente N° 2024-CU- 01888, presentado por el señor (a) **JIMMY ALEXANDER MAMANI CHARCA** solicitando **APROBACIÓN DE LA PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN** el PROVEIDO – N° 148 -2024-UI-FICP-UANCV/J, y la **FICHA DE OPINIÓN DE LA PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN** formato N° 008 -2024 del integrante del comité de investigación EPIM de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras, según al reglamento interno de trabajos de investigación conducente a grados y títulos.

CONSIDERANDO:

Que, el (la) estudiante: **JIMMY ALEXANDER MAMANI CHARCA** ha presentado su propuesta de investigación Titulado: **IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MONITOREO DE VIBRACIONES EN UNA MAQUINA DESPEDRADORA DE QUINUA**, para optar el Título Profesional de **Ingeniero Mecatrónico**.

Que, al haberse cumplido con los requisitos exigidos por el Reglamento Interno de Trabajo de Investigación Conducente a Grados y Títulos, con fines de obtención de Grados Académicos y Títulos Profesionales; el integrante del comité de investigación **Ing. Adwar Ranulfo Sanchez Carreón** de la Escuela Profesional de **Ingeniería Mecatrónica** de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras, emitió la ficha de opinión de la propuesta de investigación formato N° 008 -2024- aprobando la propuesta de investigación titulado: **IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MONITOREO DE VIBRACIONES EN UNA MAQUINA DESPEDRADORA DE QUINUA**.

Que, es requisito indispensable contar con un asesor docente ordinario y/o contratado de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras con un mínimo de cinco años de docencia, grado de doctor o magister y experiencia en la línea a investigar, o deberá estar acreditado por Resolución 0989-2022-UANCV-CU-R, quien asumirá como asesor de la propuesta de investigación, según el área o grado.

Estando, con la opinión favorable de la propuesta de investigación del Comité de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras y en concordancia al Reglamento Interno de Trabajos de Investigación Conducente a Grados y Títulos aprobado con Resolución N° 0294-2023 UANCV-CU-R. y en merito al Art. 25 del reglamento, con fines de obtención de Grados Académicos y Títulos Profesionales, y en uso a las atribuciones, que le concede la ley Universitaria N° 30220, ley de creación de la UANCV N° 23738 y modificatoria N° 24661, y el Estatuto de la UANCV, el Decano y el Director de la Unidad de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras.

RESUELVE:

ARTÍCULO PRIMERO.- APROBAR, la **PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN**, presentado por el o (la) Bachiller: **JIMMY ALEXANDER MAMANI CHARCA**, para optar el Título Profesional de **Ingeniero Mecatrónico**, con el Tema Titulado: **IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MONITOREO DE VIBRACIONES EN UNA MAQUINA DESPEDRADORA DE QUINUA** correspondiente a la línea de investigación **TECNOLOGÍA DE LA INSTRUMENTACIÓN**.

La misma que deberá proceder con la ejecución de la propuesta de Investigación aprobado de acuerdo a lo establecido en el Reglamento Interno de Trabajo de Investigación Conducente a Grados y Títulos, con fines de obtención de Grados Académicos y Títulos Profesionales.

ARTÍCULO SEGUNDO.- RECONOCER como **ASESOR DE INVESTIGACIÓN** de al (a la) docente **M.Sc. MARIO ALEJANDRO RAMOS HERRERA**.

ARTÍCULO TERCERO.- DISPONER que, la Unidad de Investigación, Responsables del Comité de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras y el Director de la Escuela Profesional de **Ingeniería Mecatrónica** quedan encargados del cumplimiento de la presente Resolución.

Regístrese, Comuníquese, Archívese.



UNIVERSIDAD ANDINA "NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ"
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS PURAS

MILTHON QUISPE HUANCA
DECANO
CIP. 47790



Dr. Efraim Parillo Sosa
DIRECTOR
UNIDAD DE INVESTIGACIÓN

cc.
Archivo 2024
Interesado (a)



15% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

- 11% Fuentes de Internet
- 1% Publicaciones
- 8% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.



Metadatos Complementarios

Título de la tesis	
IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MONITOREO DE VIBRACIONES EN UNA MAQUINA DESPEDRADORA DE QUINUA	
Datos de autor	
Nombres y apellidos	JIMMY ALEXANDER MAMANI CHARCA
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	73958840
URL de ORCID	https://orcid.org/0009-0007-6583-3264
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	RICARDO ANIBAL MALDONADO MAMANI
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	02429806
URL de ORCID	https://orcid.org/0009-0009-1482-3669
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	SALVADOR TEODORO VALDIVIA CARDENAS
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	02383061
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	ABELARDO LEON MIRANDA
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	40198643
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	ADWAR RANULFO SANCHEZ CARREON
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	02064066



Datos de investigación	
Línea de investigación	Tecnología de la instrumentación – P21
Grupo de investigación	No aplica.
Agencia de financiamiento	Sin financiamiento
Ubicación geográfica de la investigación	País: Perú Departamento: Puno Provincia: Puno Distrito: Puno Longitud oeste: -15.481851250200059, - Latitud sur: -70.12075060454241
	 <p>Url: https://goo.su/aiWVe</p>
Año o rango de años en que se realizó la investigación	Junio 2023 - diciembre 2024
URL de disciplinas OCDE https://concytec-pe.github.io/Peru-CRIS/vocabularios/ocde_ford.html - Librería	Ingeniería mecánica https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.03.01 Mecánica aplicada https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.03.02



UNIVERSIDAD NACIONAL "NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ"
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y TECNOLOGÍAS

Dr. Fritz Willy Mamani Apaza
DIRECTOR
UNIDAD DE INVESTIGACIÓN



DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD Y RESPONSABILIDAD

Yo JIMMY ALEXANDER MAMANI CHARCA identificado con DNI Nro. 73958840 en mi condición de egresado de:

- Escuela Profesional
- Programa de Segunda Especialidad,
- Programa de Maestría o Doctorado

MECATRONICA

informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación, Trabajo Académico denominada:

IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MONITOREO DE VIBRACIONES EN UNA MAQUINA DESPEDRADORA DE QUINUA

Asesorado por: Dr. RICARDO ANIBAL MALDONADO MAMANI

Es un tema original.

Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y **no existe plagio/copia** de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

El incumplimiento de lo declarado da lugar a responsabilidad del declarante, en consecuencia; a través del presente documento asumo frente a terceros, la Universidad Andina Néstor Cáceres Velásquez y/o la Administración Pública toda responsabilidad que pueda derivarse por el trabajo final presentado. Lo señalado incluye responsabilidad pecuniaria incluido el pago de multas u otros por los daños y perjuicios que se ocasionen.

Juliaca 21 de agosto del 2025

Firma del Asesor
(obligatoria)

Firma del Estudiante
(obligatoria)



Huella



DEDICATORIA

A Dios, fuente infinita de sabiduría y fortaleza, quien me ha guiado en cada paso de este camino y ha iluminado mi vida con su amor y bendiciones.

A mi mentor, Justo Germán Charca Atamari, por su paciencia, dedicación y ejemplo constante, que han sido una inspiración invaluable para alcanzar este logro.

A mi abuelo, Víctor Charca, cuyo legado de esfuerzo y valores ha sido una guía constante en mi vida. Su memoria vive en cada uno de mis éxitos.

A mi madre, Mispa Olimpia, por su amor incondicional, sacrificio y apoyo constante. Su fe en mí ha sido mi mayor impulso para superar cualquier obstáculo.

Con gratitud y amor, esta tesis es para ustedes.



AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradezco a Dios, por ser mi fortaleza en los momentos difíciles y mi guía constante en este camino académico.

A mi mentor, Justo Germán Charca Atamari, por compartir su conocimiento, paciencia y apoyo incondicional a lo largo de este proceso, siendo un pilar fundamental para alcanzar este logro.

A mi abuelo, Víctor Charca, quien, con su ejemplo de vida, me enseñó la importancia del esfuerzo, la honestidad y la perseverancia. Su legado es mi fuente de inspiración.

A mi madre, Mispa Olimpia, por su amor incondicional, sacrificios y palabras de aliento que me dieron la fuerza para nunca rendirme.

A la Universidad Andina Néstor Cáceres Velásquez, por brindarme la oportunidad de formarme profesionalmente y proporcionarme las herramientas necesarias para alcanzar mis objetivos. Mi gratitud a los docentes y compañeros que enriquecieron este viaje con sus conocimientos y experiencias.

Finalmente, a todos aquellos que, de una u otra manera, contribuyeron a mi desarrollo personal y académico. A todos ustedes, mi más sincero agradecimiento



ÍNDICE DE GENERAL

DEDICATORIA.....	i
AGRADECIMIENTO.....	ii
ÍNDICE DE GENERAL.....	iii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	v
ÍNDICE DE TABLAS.....	vii
RESUMEN.....	viii
ABSTRACT.....	ix
INTRODUCCIÓN.....	x

CAPITULO I

ASPECTOS GENERALES

1. 1 Descripción del problema.....	1
1. 2 Formulación del problema.....	2
1. 3 Formulación del problema.....	2
1. 3. 1 Problema general.....	2
1. 3. 2 Problemas específicos.....	2
1. 4 Justificación de estudio.....	3
1. 5 Objetivos de la investigación.....	4
1. 5. 1 Objetivo general.....	4
1. 6 Importancia.....	4
1. 7 Limitación de la investigación.....	4
1. 8 Hipótesis de la investigación.....	5
1. 8. 1 Hipótesis general.....	5
1. 8. 2 Hipótesis específicas.....	5



1. 9 Variables de investigación..... 6
1. 10 Operacionalización de variables..... 6

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2. 1 Antecedentes de la investigación 7
 2. 1. 1 Nivel internacional 7
 2. 1. 2 A nivel nacional 9
2. 2 Bases teóricas 11

CAPITULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3. 1 Método de investigación..... 75
3. 2 Tipo de investigación..... 75

CAPITULO IV

ANALISIS DE RESULTADO Y DISCUSION

4. 1 Presentación 78
4. 2 Pruebas y resultado 86
4. 3 Análisis e interpretación de resultados 88
4. 4 Discusión de resultados 91
CONCLUSIONES..... 93
RECOMENDACIONES 94
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 95
ANEXOS 101



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 PLC S7-1200 Siemens, sf.	19
Figura 2 Módulo CM1241 RS485	21
Figura 3 Sensor de temperatura y vibración.....	22
Figura 4 Paneles de gama Comfort de Simatic HMI. Siemens.....	24
Figura 5 Vista trasera de un Panel de la gama Comfort de Simatic HMI.....	25
Figura 6 Software Tia portal V16	26
Figura 7 Variador de velocidad Sinamics V20	29
Figura 8 Vibraciones en rodamientos	32
Figura 9 Sensor de movimiento o desplazamiento	46
Figura 10 Sensor de velocidad	46
Figura 11 Sensor de aceleración.....	49
Figura 12 Frecuencia y amplitud en función del tiempo.....	50
Figura 13 Unidades de medición de las vibraciones	51
Figura 14 Interrelación de unidades de medición de vibraciones	52
Figura 15 Interpretación de unidades de medición de vibraciones.....	53
Figura 16 Carta de Rathbone	59
Figura 17 Tabla de severidad de vibración según norma ISO 2372.....	60
Figura 18 Parámetros que definen la vibración	64
Figura 19 FFT de ondas vibratorias.....	67
Figura 20 FFT a partir de señales sinusoidales.....	67
Figura 21 Componentes de un espectro de vibración	69
Figura 22 Espectro de vibración por desbalance.....	70
Figura 23 Desalineación Paralela.....	71
Figura 24 Desalineación Angular.....	71



Figura 25 Tipos de holgura mecánica	72
Figura 26 Maquina despedadora de quinua utilizada para las pruebas	78
Figura 27 Inicializador del programa Simatic Tia Portal.....	79
Figura 28 Interfaz de elección de dispositivos	79
Figura 29 Visualización del dispositivo y de los módulos añadidos.....	79
Figura 30 Definición de variables de entrada y salida	80
Figura 31 Configuración de parámetros de comunicación Modbus.....	80
Figura 32 dirección de los datos.....	81
Figura 33 Realización de operaciones matemáticas	81
Figura 34 Realización de conversiones.....	82
Figura 35 Registros de datos.....	83
Figura 36 Medición del sistema de vibración.....	85
Figura 37 Elección de la pantalla HMI	85
Figura 38 Comunicación PLC - HMI	86
Figura 39 Tablero utilizado en el sistema de vibraciones	86
Figura 40 Medición de la vibración en la criba vibratoria.....	87
Figura 41 Medición de la vibración en la base de la criba vibratoria	87
Figura 42 Prueba en vaco del sistema de monitoreo de vibraciones	88
Figura 43 Prueba en la criba vibratoria.....	89
Figura 44 Prueba en la base de la criba vibratoria	89



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Operacionalización de variables	6
Tabla 2 Técnicas e instrumentos de recogida de información	76
Tabla 3 Recogida de datos	77



RESUMEN

La presente tesis tiene como objetivo principal la implementación de un sistema de monitoreo de vibraciones en una máquina despedradora de quinua, con el fin de mejorar la eficiencia operativa y prevenir fallas mecánicas. La despedradora es una máquina clave en el proceso de postcosecha de la quinua, encargada de separar impurezas como piedras del grano.

El trabajo parte del diagnóstico del estado actual de la máquina, identificando los puntos críticos donde se generan vibraciones excesivas que pueden causar desgaste prematuro o fallas estructurales. Para ello, se utilizan sensores de vibración conectados a un PLC que permiten recopilar datos en tiempo real. Estos datos son procesados y analizados para detectar patrones anómalos.

La metodología incluye la instalación del sistema de monitoreo, pruebas en campo, análisis de frecuencias para los resultados. Se evalúan parámetros como la frecuencia, amplitud y dirección de las vibraciones.

Como resultado, se logró una detección temprana de irregularidades en el funcionamiento de la máquina, reduciendo los tiempos de inactividad y mejorando la vida útil de sus componentes. Se concluye que el sistema de monitoreo propuesto es una herramienta eficaz y económica para el mantenimiento predictivo en el agroindustria de la quinua.

Palabras clave: Sistema de monitoreo, vibraciones, maquina despedradora de quinua.



ABSTRACT

The main objective of this thesis is the implementation of a vibration monitoring system in a quinoa de-stoning machine, aiming to improve operational efficiency and prevent mechanical failures. The de-stoner is a key machine in the post-harvest process of quinoa, responsible for separating impurities such as stones from the grain.

The work begins with a diagnosis of the current state of the machine, identifying critical points where excessive vibrations occur, which may cause premature wear or structural failures. For this purpose, vibration sensors connected to a PLC are used to collect real-time data. This data is then processed and analyzed to detect abnormal patterns.

The methodology includes the installation of the monitoring system, field testing, and frequency analysis of the results. Parameters such as vibration frequency, amplitude, and direction are evaluated.

As a result, early detection of irregularities in the machine's operation was achieved, reducing downtime and improving the lifespan of its components. It is concluded that the proposed monitoring system is an effective and cost-efficient tool for predictive maintenance in the quinoa agro-industry.

Keywords: Monitoring system, vibrations, quinoa de-stoning machine.



INTRODUCCIÓN

La quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) es un grano andino de alto valor nutricional que ha adquirido gran importancia en los mercados nacionales e internacionales. Debido a su creciente demanda, los procesos de postcosecha, como la limpieza y clasificación del grano, han cobrado especial relevancia en la agroindustria. Uno de los equipos fundamentales en esta etapa es la máquina despedradora, cuya función principal es eliminar impurezas como piedras y residuos sólidos presentes en la quinua.

Sin embargo, durante su operación, este tipo de maquinaria está expuesta a vibraciones constantes que, si no se controlan adecuadamente, pueden generar problemas mecánicos, desgaste prematuro de componentes, pérdida de eficiencia e incluso fallas estructurales. En este contexto, el monitoreo de vibraciones se presenta como una herramienta clave para el mantenimiento predictivo, ya que permite detectar anomalías antes de que se conviertan en fallas críticas.

La presente investigación tiene como objetivo implementar un sistema de monitoreo de vibraciones en una máquina despedradora de quinua, utilizando sensores conectados a un controlador lógico programable (PLC). Este sistema permitirá registrar y analizar datos en tiempo real, proporcionando información valiosa para la toma de decisiones relacionadas con el mantenimiento y operación de la maquinaria.

A través de este estudio se busca no solo optimizar el rendimiento de la máquina, sino también contribuir a la sostenibilidad de los procesos productivos en la agroindustria de la quinua, promoviendo el uso de tecnologías accesibles y eficientes para el monitoreo y diagnóstico de fallas.



CAPITULO I

ASPECTOS GENERALES

1.1 Descripción del problema

En el proceso de poscosecha de quinua, la máquina despedradora cumple una función clave al separar piedras e impurezas del grano. Sin embargo, este tipo de maquinaria está expuesta a condiciones operativas que pueden generar vibraciones excesivas o anómalas, causadas por factores como desalineación, desbalanceo, desgaste de componentes o fallas en el sistema mecánico.

Actualmente, muchas de estas máquinas operan sin un sistema de monitoreo en tiempo real que permita identificar dichas vibraciones de forma precisa y oportuna. Como resultado, las fallas suelen detectarse solo cuando ya se han producido daños importantes, lo que conlleva paradas no planificadas, disminución de la eficiencia operativa, altos costos de mantenimiento correctivo y riesgo de afectación a la calidad del producto.

La falta de un sistema automatizado de monitoreo limita la posibilidad de implementar un mantenimiento predictivo, que permita anticiparse a los problemas antes de que se conviertan en fallas críticas. Esta situación evidencia la necesidad de desarrollar e implementar una solución tecnológica que permita monitorear continuamente el comportamiento vibracional de la máquina, mejorando así su rendimiento, seguridad y vida útil.



1. 2 Formulación del problema

En la agroindustria de la quinua, el proceso de despedrado es fundamental para garantizar la calidad del producto final. La máquina despedradora, encargada de separar impurezas sólidas como piedras del grano, opera de manera continua y bajo condiciones mecánicas que pueden generar vibraciones excesivas. Estas vibraciones, si no son monitoreadas ni controladas, pueden ocasionar desgaste prematuro de componentes, fallas inesperadas, paradas no programadas y disminución en la eficiencia operativa.

Actualmente, muchas de estas máquinas operan sin un sistema que permita el monitoreo en tiempo real de las condiciones mecánicas, lo que limita la capacidad de detección temprana de fallas y aumenta los costos de mantenimiento correctivo. Esta situación evidencia la necesidad de implementar herramientas tecnológicas que faciliten un mantenimiento predictivo eficaz.

1. 3 Formulación del problema

1. 3. 1 Problema general

¿Como implementar un sistema de monitoreo de vibraciones en una maquina despedradora de quinua?

1. 3. 2 Problemas específicos

¿De qué manera se realiza la selección de sensores de vibración para el monitoreo de vibraciones en una maquina despedradora de quinua?

¿Como se desarrolla la programación del PLC para la adquisición de datos del sistema de vibración?

¿De qué manera se realiza el sistema de monitoreo de vibraciones a través de un HMI?



1.4 Justificación de estudio

La creciente demanda de quinua tanto en el mercado nacional como internacional ha impulsado la tecnificación de los procesos agroindustriales asociados a su producción. Uno de los procesos críticos en la etapa de postcosecha es la despedra, cuya finalidad es garantizar la pureza del grano eliminando impurezas como piedras, tierra y otros residuos sólidos. Para ello, se emplean máquinas despedradoras que operan de manera continua y están expuestas a esfuerzos mecánicos que generan vibraciones.

El monitoreo de estas vibraciones es esencial, ya que su exceso puede provocar fallas mecánicas no previstas, paradas inesperadas en la producción, mayores costos de mantenimiento y una disminución en la eficiencia operativa. A pesar de ello, muchas máquinas en el sector agroindustrial operan sin sistemas adecuados de monitoreo, lo cual limita la capacidad de anticipar y corregir fallas de manera oportuna.

La implementación de un sistema de monitoreo de vibraciones representa una solución tecnológica viable y económica, especialmente mediante el uso de sensores conectados a un PLC que permita registrar y analizar datos en tiempo real. Esta herramienta puede ser fundamental para aplicar un mantenimiento predictivo, lo que no solo reduce los costos de reparación, sino que también extiende la vida útil de los equipos y mejora la productividad.

Este estudio es relevante porque promueve el uso de tecnología accesible y adaptable al contexto agroindustrial local, contribuyendo así al desarrollo sostenible de la cadena productiva de la quinua. Además, ofrece una propuesta replicable en otros equipos agrícolas, abriendo la posibilidad de una transformación tecnológica más amplia en el sector.



1.5 Objetivos de la investigación

1.5.1 Objetivo general

Implementar un sistema de monitoreo de vibraciones en una maquina despedradora de quinua.

1.5.2 Objetivos específicos

OE1. Seleccionar los sensores de vibración para el monitoreo de vibraciones en una maquina despedradora de quinua.

OE2. Desarrollar la programación del PLC para la adquisición de datos del sistema de vibración.

OE3. Realizar el sistema de monitoreo de vibraciones a través de un HMI.

1.6 Importancia

Es importante porque introduce una herramienta tecnológica que permite detectar fallas mecánicas en tiempo real, mejorando el mantenimiento y funcionamiento de una máquina clave en el procesamiento de quinua. Este sistema ayuda a prevenir daños, reduce tiempos de inactividad y asegura una mayor eficiencia en la producción. Además, representa un avance hacia la modernización del sector agroindustrial, promoviendo el uso de tecnologías en procesos tradicionales. Su aplicación no solo mejora la calidad del producto final, sino que también contribuye al desarrollo económico y técnico de regiones productoras de quinua.

1.7 Limitación de la investigación

Durante el desarrollo de esta investigación se presentaron ciertas limitaciones técnicas y logísticas que condicionaron el alcance del estudio. Una de las principales limitaciones fue la disponibilidad de recursos económicos, lo cual



restringió el acceso a sensores de alta gama y sistemas avanzados de adquisición de datos. Por esta razón, se optó por utilizar componentes de bajo costo y tecnología accesible, lo que, si bien cumplió con los objetivos del proyecto, pudo influir en la precisión de las mediciones obtenidas. Además, la implementación del sistema se realizó en una única máquina despedradora de quinua, lo que limita la generalización de los resultados a otros modelos o condiciones de operación distintas.

Otro factor a considerar fue el tiempo limitado para la ejecución del monitoreo en campo, lo que impidió realizar un seguimiento a largo plazo que permitiera evaluar la evolución de las vibraciones ante diferentes estados de desgaste de la máquina o condiciones estacionales. Asimismo, las variaciones propias del proceso de despedrado, como la humedad del grano, la carga de trabajo o el mantenimiento previo generaron condiciones operativas variables que pudieron influir en los resultados. A pesar de estas limitaciones, el estudio demostró la viabilidad técnica y funcional de un sistema de monitoreo de vibraciones como herramienta de mantenimiento predictivo en la agroindustria de la quinua.

1. 8 Hipótesis de la investigación

1. 8. 1 Hipótesis general

La implementación de un sistema de monitoreo de vibraciones en una máquina despedradora de quinua permitirá detectar irregularidades operativas y prevenir fallas mecánicas, mejorando la eficiencia y el mantenimiento del equipo.

1. 8. 2 Hipótesis específicas

La correcta selección de sensores de vibración adecuados para la máquina despedradora de quinua permitirá obtener datos precisos y confiables sobre el comportamiento dinámico del equipo.



La programación adecuada del PLC garantizará una adquisición efectiva de datos en tiempo real, facilitando el monitoreo continuo de las vibraciones de la máquina.

La implementación de un sistema de monitoreo de vibraciones a través de una interfaz HMI permitirá visualizar y analizar de forma clara y oportuna los parámetros de vibración, contribuyendo a la toma de decisiones en el mantenimiento preventivo.

1. 9 Variables de investigación

Variable Independiente: Sistema de monitoreo de vibraciones

Variable dependiente: Comportamiento operativo de la máquina despedradora

1. 10 Operacionalización de variables

Tabla 1

Operacionalización de variables

TIPO DE VARIABLE	VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES	UNIDAD
Variable Independiente	Sistema de monitoreo de vibraciones	Adquisición de datos (PLC)	Tasa de muestreo del sistema	Hz.
Variable Dependiente	Comportamiento operativo de la máquina despedradora	Niveles de vibración	Aceleración promedio medida en operación	mm/s ²

Nota: Elaboración propia



CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2. 1 Antecedentes de la investigación

2. 1. 1 Nivel internacional

(Anrango, 2023) Las vibraciones mecánicas generadas en mesas vibratorias mediante señales senoidales representan uno de los escenarios más frecuentes en los entornos industriales. Este fenómeno se observa comúnmente en equipos rotativos como bombas centrífugas, turbinas, lavadoras y sistemas clasificadores. En este contexto, resulta crucial comprender cómo influyen parámetros como la masa, la constante elástica y la constante de amortiguamiento en el comportamiento del sistema. La interacción entre estos elementos resulta determinante para el control de la vibración, ya que operar cerca del estado de resonancia puede causar perturbaciones significativas con un mínimo de energía, lo que incrementa el riesgo de daño a los equipos. El objetivo del trabajo de Anrango es presentar un modelo matemático que represente el sistema vibratorio de una mesa vibratoria, a partir del análisis de las fuerzas involucradas en un sistema masa-resorte-amortiguador. Mediante un diagrama de cuerpo libre, se formulan las ecuaciones dinámicas del sistema y se definen parámetros clave como la amplitud pico a pico, la constante de disipación del aire, el factor de amplificación y la ecuación general del movimiento. Posteriormente, se determina el decremento



logarítmico y se analiza el equilibrio de fuerzas para caracterizar el comportamiento dinámico del sistema vibratorio.

(Marin, 2021) Verificar las frecuencias naturales teóricas de un sistema experimental de rotor-buje es el objetivo de esta investigación. Esto se logró mediante el uso de un modelo basado en el enfoque de elementos finitos para identificar los modos de vibración del sistema. Se utilizaron herramientas de hardware y software de código abierto para la validación experimental. Sistemas electromecánicos y electrónicos se incorporan a la instrumentación del banco de pruebas para garantizar su correcto funcionamiento. Por último, se utilizó un procedimiento de software creado especialmente para este propósito para implementar una técnica de identificación de parámetros modales.

El aparato, que se encuentra en el Laboratorio de Posgrado del Instituto Tecnológico de Pachuca, se utilizará para instruir a los estudiantes en los fundamentos del análisis de vibraciones y la detección de fallas en maquinaria rotativa. La base del proyecto es el enfoque educativo conocido como "aprender haciendo", que facilita a los estudiantes validar modelos matemáticos o elementos finitos en situaciones del mundo real, como lo hace este estudio.

(Aroca, 2018) El estudio se centra en examinar las vibraciones que se generan en motores asíncronos trifásicos, utilizándolas como herramienta para detectar y diagnosticar posibles fallos en los componentes del equipo. Esta técnica forma parte esencial del mantenimiento predictivo, ya que el movimiento rotacional del eje propio de las máquinas rotativas produce inevitablemente vibraciones. Si bien estas deben mantenerse dentro de límites tolerables y constantes, el desgaste progresivo de los elementos internos provoca un aumento de dichas vibraciones, lo cual puede derivar en fallas prematuras. En muchos casos, esto exige la sustitución



de piezas antes de que se produzca un daño mayor que interrumpa parcial o totalmente la producción. Dado que cada componente del motor genera vibraciones con una frecuencia específica, es posible identificar cuál de ellos presenta deficiencias mediante el análisis de la fuerza vibratoria. Esta evaluación permite anticiparse a fallos críticos. El proyecto aborda las propiedades de los distintos elementos que conforman los motores asíncronos, las causas comunes de las vibraciones, los instrumentos adecuados para su medición y las estrategias para incorporar este análisis dentro de un esquema de mantenimiento predictivo.

2. 1. 2 A nivel nacional

(Crespo, 2021) En el contexto de una planta dedicada a procesos textiles, se ha identificado una problemática constante relacionada con niveles elevados de vibración mecánica en los motores, lo cual ha derivado en interrupciones inesperadas en la producción. Frente a esta situación, la Gerencia de Operaciones ha optado por incorporar un sistema automatizado de monitoreo de condiciones vibratorias. Esta solución contempla el análisis en tiempo real del espectro de vibración, visualizado a través de la plataforma Maintraq, permitiendo así una supervisión continua y precisa del comportamiento dinámico de los motores, con el propósito de garantizar una operación confiable y sostenida. No obstante, con el objetivo de lograr una operación más confiable, la organización optó por emplear la metodología RCM (Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad), orientada a estructurar planes de mantenimiento industrial enfocados en la funcionalidad y seguridad de los equipos. Una de las formas prácticas de implementación de esta metodología consiste en estructurar estrategias de mantenimiento predictivo basadas en el análisis de vibraciones mecánicas. Esto posibilita anticipar el comportamiento de la intensidad vibratoria a través de sensores acelerométricos,



los cuales convierten las oscilaciones mecánicas en señales eléctricas. Estas señales son interpretadas por el equipo Vibraspec 800, el cual se encuentra integrado a un sistema computacional que permite visualizar los espectros de vibración. Esta información es posteriormente analizada por personal técnico especializado, con el propósito de valorar los niveles de vibración de acuerdo con los lineamientos establecidos por la norma ISO 10816-3. La comunicación entre los equipos se ha implementado de forma inalámbrica utilizando una configuración punto a punto, abarcando una distancia de 200 metros. Para ello, se empleó un punto de acceso TP-Link modelo TL-WA7510N, diseñado para exteriores, que opera a una frecuencia de 5 GHz, con una potencia de 500 mW y una velocidad de transmisión de hasta 150 Mbps.

(Ricaldi, 2020) Plantea que el diseño y modelado de una máquina destinada al desgranado y clasificación de granos secos de maíz amiláceo responde a una necesidad urgente del sector agrícola en la región de Junín, específicamente en el valle del Mantaro. En esta zona, el proceso aún se realiza manualmente, lo que genera una notable pérdida de tiempo productivo y baja eficiencia. El proyecto busca optimizar estos procesos automatizando el desgranado, además de reducir significativamente los daños por fractura en los granos, que actualmente oscilan entre un 20 % y un 30 % en las máquinas de impacto utilizadas.

(Villaverde, 2019) El sistema desarrollado para la supervisión de las variables de vibración y caudal se compone de tres etapas principales: recolección, análisis y visualización de la información. La etapa de adquisición se lleva a cabo mediante sensores de vibración modelo VSA101 de la marca IFM Electronic, junto con un medidor de caudal electromagnético SITRANS 3100, el cual ha sido instalado en una línea de descarga de seis pulgadas de diámetro. La información



capturada es gestionada por un PLC ControlLogix 1756, que se encarga de procesar los datos para luego ser integrados y visualizados mediante el entorno SCADA Factory Talk SE. En cuanto a los sensores de vibración, estos han sido colocados en ubicaciones clave del sistema, distribuidos en cuatro puntos estratégicos para garantizar un monitoreo eficaz: En el lado libre del motor (ventilador), en el acople motor, en el acople bomba y en el lado libre de la bomba. Todos estos dispositivos envían señales al PLC, las cuales son registradas continuamente durante el funcionamiento en turnos diurnos y nocturnos. Estas señales son transmitidas a través de un sistema que incluye un transmisor, un switch y una red Ethernet, permitiendo así una supervisión en tiempo real mediante la interfaz SCADA.

2. 2 Bases teóricas

2. 2. 1 Monitoreo

(Colomer , Meléndez, & Ayza, 2000) Señalan que en el entorno industrial contemporáneo se ha dejado de lado el uso de sistemas productivos rígidos y estáticos, reemplazándolos por modelos más flexibles y adaptables, diseñados para responder de manera continua a las exigencias cambiantes del mercado. Sin embargo, esta evolución implica una mayor complejidad en los procesos y una fuerte interdependencia entre sus fases, lo que complica su gestión y adaptación. La situación se torna más compleja ante las actuales demandas de eficiencia total, reducción al mínimo de los inventarios y una elevada exactitud en la ejecución de los procesos. En consecuencia, la supervisión continua del proceso resulta indispensable para identificar desviaciones y aplicar correcciones a tiempo. Esta tarea implica la automatización del seguimiento, brindando al operador sistemas de alerta, interfaces intuitivas y almacenamiento de datos históricos. Su propósito es



asegurar una vigilancia constante que permita el diagnóstico de fallos mediante el control dinámico de las variables del proceso, ya que las decisiones deben ajustarse de manera permanente al comportamiento del producto durante su transformación.

Por tanto, es imprescindible contar con interfaces apropiadas para interactuar con el proceso, así como con sistemas complementarios de alarma y herramientas de apoyo a la toma de decisiones. La conservación de registros históricos debe facilitar tanto la detección y análisis de condiciones anómalas como la atención a eventuales reclamaciones. Esto garantiza la trazabilidad del producto terminado, haciendo posible incluso el análisis de incidencias en la etapa postventa.

Los sistemas modernos de monitoreo integran estas funciones mediante la medición continua de las variables del proceso y la implementación de mecanismos de alerta vinculados a dichas variables.

El desarrollo de interfaces gráficas debe alinearse con la naturaleza de la información mostrada, facilitando su comprensión directa por parte del operador. Dentro de este entorno, recursos como alarmas y curvas de tendencia adquieren un papel fundamental para la detección temprana de fallos, simplificando la labor de monitoreo. A su vez, se destaca la relevancia de conservar registros históricos del proceso, ya que estos respaldan el análisis de desviaciones y permiten establecer comparaciones con condiciones operativas anteriores. En este marco, las bases de datos cumplen una función estratégica al posibilitar el intercambio y la interoperabilidad de información entre diversas aplicaciones del sistema.

2. 2. 2 Componentes de un Sistema de Monitoreo

(Montalvo, 2005) La figura siguiente ilustra los elementos que conforman un sistema de monitoreo, los cuales se describen brevemente en los párrafos posteriores.

Figura 1

Componentes de un Sistema de Monitoreo

Nota. Sistema de monitoreo Fuente: (Montalvo, 2005)

2. 2. 3 Variables de proceso

Dentro de los sistemas de monitoreo, las variables que intervienen en el proceso suelen dividirse en dos grupos: de entrada y de salida. A su vez, estas pueden manifestarse como señales analógicas o discretas, dependiendo de su naturaleza. Las variables de entrada representan el estado actual del proceso y se detectan para ser transmitidas al sistema de control. Un ejemplo claro de ello es la medición de la temperatura en un fluido o la detección del arranque de un motor. En cambio, las variables de salida corresponden a las señales que el sistema de control emite hacia los dispositivos actuadores, tales como iniciar el funcionamiento de un equipo o accionar una válvula.

En cuanto a su naturaleza, las variables discretas también denominadas booleanas se caracterizan por limitarse a dos posibles estados, como encendido/apagado o abierto/cerrado. En contraste, las variables analógicas presentan un comportamiento continuo, lo que les permite variar dentro de un intervalo definido, reflejando así cambios más precisos en el proceso monitoreado. Por ejemplo, un sensor de temperatura con un intervalo entre 0 °C y 100 °C puede



proporcionar valores como $12.567\text{ }^{\circ}\text{C}$, en función de la resolución y precisión del instrumento utilizado. Todas las señales se expresan mediante algún tipo de señal.

2. 2. 4 Sensores, Transductores y Transmisores.

Los sensores son los dispositivos encargados de captar las variables presentes en un proceso, como temperatura, presión o nivel. A partir de estas mediciones, emiten señales que reflejan dichos valores, las cuales pueden clasificarse como analógicas o discretas. Un ejemplo de señal analógica es la generada por una termocupla, que produce una salida en milivoltios proporcional a la temperatura. En contraste, un presostato emite una señal discreta que informa si la presión ha superado o no el umbral configurado. En general, las señales discretas se transmiten utilizando niveles de voltaje específicos, comúnmente 24 VDC o 110 VAC. Por su parte, las señales analógicas pueden expresarse en diferentes unidades como miliamperios, milivoltios, voltios, ohmios, psig o incluso pulsos. Dentro del entorno industrial, el estándar más utilizado es la señal de corriente de 4 a 20 miliamperios, donde 4 mA representa el valor mínimo de la variable medida y 20 mA el valor máximo.

Los transmisores cumplen la función de trasladar la señal detectada por un sensor hasta el equipo responsable de su interpretación, ya sea un controlador o un sistema de recopilación de datos. Dicha señal es enviada con una proporción directa respecto al valor real de la variable que se ha medido. Por ejemplo, un transmisor de temperatura diseñado para operar entre $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ puede emitir una señal de 12 mA dentro del estándar industrial de 4–20 mA. En los transmisores digitales actuales, esta información es enviada en formato numérico mediante protocolos de comunicación digitales establecidos

2. 2. 5 Acondicionadores de Señal

Por su parte, los acondicionadores de señal son equipos que transforman un tipo de señal en otra compatible con los sistemas de control o adquisición. Esto es común cuando los sensores generan señales en formatos no reconocidos directamente por los controladores. Además de convertir señales, estos dispositivos pueden aislar eléctricamente, filtrar o procesar las señales entrantes. Un ejemplo típico es una celda de carga, que genera una señal en ohmios en función del peso aplicado. Como los controladores no están diseñados para interpretar este tipo de señal, se requiere un acondicionador que la convierta en miliamperios. Adicionalmente, este acondicionador puede proporcionar aislamiento eléctrico entre el sensor y el controlador, lo cual es fundamental cuando ambos están alimentados por fuentes con referencias de tierra distintas, especialmente si se encuentran alejados físicamente entre sí.

2. 2. 6 Controladores y sistemas de control.

En los sistemas de control automatizados, los controladores desempeñan el papel principal en la ejecución de la lógica de control aplicada al proceso. Estos pueden clasificarse como discretos cuando controlan una sola variable, o multivariable cuando gestionan varias al mismo tiempo. Además, su funcionamiento puede ser analógico si emplean señales continuas, o digital si operan con datos numéricos. Algunos controladores permiten programación personalizada, mientras que otros poseen configuraciones fijas.

Según su modo de operación, los controladores pueden implementar distintos tipos de control: el control On/Off activa una salida, como una válvula, cuando la variable del proceso supera un valor definido, y la desactiva al bajar de ese umbral. Una variante de este enfoque es el control de tiempo proporcional,



donde la duración de la salida activa depende del tiempo que la variable permanece fuera del rango deseado. El control PID, más sofisticado, combina tres componentes: el proporcional responde a la desviación inmediata respecto al valor deseado, el integral considera el tiempo acumulado de dicha desviación, y el derivativo actúa según la velocidad de cambio. Estos tres elementos se integran para producir una señal de salida única, cuyos niveles se regulan mediante parámetros como la constante proporcional, la constante de tiempo integral y la constante de tiempo derivativo.

Como evolución del PID tradicional, el control adaptativo ajusta de forma continua los parámetros del controlador según las condiciones cambiantes del proceso, siendo especialmente útil en sistemas donde las propiedades del material varían considerablemente, como en los reactores donde los reactivos incrementan su viscosidad con el tiempo.

2. 2. 7 Elementos de Control Final

Por su parte, los elementos de control final son los encargados de ejecutar las órdenes del controlador sobre el proceso, manipulando directamente las variables físicas involucradas. Entre estos dispositivos se encuentran las válvulas de control, actuadores y posicionadores, que influyen de manera directa en el comportamiento del sistema controlado.

2. 2. 8 Interfases Humano-Máquina

Las interfaces Hombre-Máquina (HMI) constituyen el medio mediante el cual el operador puede comunicarse con el sistema de control del proceso, proporcionando información en tiempo real y permitiendo el envío de comandos para su operación o ajuste. Estas interfaces varían ampliamente en complejidad, abarcando desde modelos básicos hasta sistemas avanzados de visualización y



control: lámparas, displays, registradores, pantallas LCD, pulsadores, selectores, mímicos, teclados, VGA, etc.

2. 2. 9 Comunicaciones

Las comunicaciones representan un componente fundamental en los sistemas modernos de supervisión, ya que permiten integrar y coordinar diversas áreas y niveles dentro del entorno industrial. La transferencia de información operativa se realiza de manera remota a través de redes de comunicación, lo que facilita una gestión centralizada y eficiente del proceso productivo.

2. 2. 10 El controlador lógico programable

De acuerdo con Pérez López. (2004) nos dice. Existen múltiples tipos de controladores lógicos programables (PLC) que varían ampliamente en cuanto a sus funciones, capacidades, diseño físico y otros aspectos técnicos, lo que permite su clasificación en diversas categorías. Uno de los tipos más utilizados es el PLC Nano, que se distingue por su estructura reducida y funcional. En este dispositivo se combinan una fuente de alimentación, el procesador principal (CPU) y las interfaces de entrada y salida (E/S).

Este tipo de PLC está diseñado para gestionar un número limitado de señales, generalmente por debajo de las 100, incluyendo entradas y salidas digitales, así como algunos módulos especializados. (ata, 1998)

2. 2. 11 Simatic S7 – 1200

El PLC-S7-1200, representa la versión más reciente dentro de la familia de controladores SIMATIC desarrollados por Siemens. Este autómatas programable, de tipo compacto, está orientado a sistemas de automatización de menor escala que demandan funciones básicas o intermedias relacionadas con lógica de control, interfaz hombre-máquina (HMI) o comunicación en red. Su diseño reducido,



accesibilidad económica y capacidad funcional lo convierten en una opción eficiente para la supervisión y control de tareas simples dentro de entornos automatizados.

Bajo la filosofía de automatización totalmente integrada (TIA, por sus siglas en inglés: Totally Integrated Automation) promovida por SIMATIC, el PLC S7-1200 junto con el entorno de desarrollo STEP 7 Basic ofrecen una solución flexible y escalable que se adapta a diversos requerimientos industriales. Esta plataforma no solo facilita la integración eficiente de múltiples dispositivos dentro de un mismo sistema, sino que también proporciona la capacidad necesaria para gestionar un amplio espectro de aplicaciones de automatización, asegurando así un control robusto y adaptable.

La unidad central de procesamiento (CPU) está equipada con un microprocesador, una fuente de alimentación interna, módulos integrados de entradas y salidas digitales, comunicación Profinet incorporada, capacidades de control de movimiento de alta velocidad y entradas analógicas integradas. Al cargar el programa en la CPU, esta ejecuta de forma autónoma la lógica requerida para supervisar y gestionar los distintos dispositivos vinculados al proceso industrial.

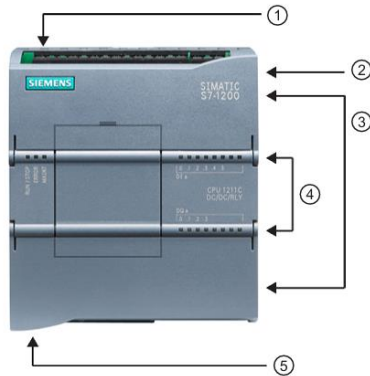
La CPU supervisa constantemente el estado de las entradas y modifica las salidas de acuerdo con la lógica definida en el programa del usuario. Esta lógica puede incluir instrucciones de temporización, conteo, operaciones matemáticas avanzadas y funciones de comunicación con otros dispositivos inteligentes dentro del sistema de automatización.

Para establecer comunicación con una unidad de programación, la CPU está equipada con un puerto PROFINET integrado. Este puerto permite la interacción con paneles HMI u otras CPUs conectadas dentro de la misma red PROFINET. Además, con el objetivo de resguardar la seguridad de la aplicación, se incluye un

sistema de protección mediante contraseña que regula el acceso a las funciones del controlador. (Siemens, sf)

Figura 2

PLC S7-1200 Siemens, sf.



Nota. Manual S7-1200

- 1.- Terminal de alimentación
- 2.- Ranura para tarjeta de memoria debajo de la parte superior puerta
- 3.- Cableado de usuario extraíble Conectores
- 4.- LED de estado para el encendido E/S de la placa
- 5.- Terminal PROFINET (encendido parte inferior de la CPU)

El ámbito de uso del S7-1200 abarca desde funciones básicas como el reemplazo de relés y contactores, hasta operaciones más complejas vinculadas a la automatización de redes y sistemas de distribución. Este controlador está diseñado para llevar a cabo tanto tareas de control en lazo abierto como cerrado, siendo ampliamente empleado en la fabricación de maquinaria y en la ingeniería de instalaciones industriales.

Una propiedad esencial del PLC es la operación cíclica de su CPU, y uno de los indicadores clave de su desempeño es el denominado tiempo de ciclo. Este representa el intervalo requerido para procesar un conjunto de instrucciones. No obstante, dado que cada instrucción posee tiempos de ejecución distintos, se ha



estandarizado como referencia el tiempo necesario para ejecutar un bloque de 1 Kbyte de memoria sin contenido.

De manera general, los controladores lógicos programables (PLC) operan bajo dos modos principales. El primero, conocido como MODO DE PROGRAMACIÓN (PROGRAM MODE), habilita la creación, edición y transferencia del programa de control desde el software de desarrollo o consola hacia la memoria del PLC.

El segundo modo de operación, denominado MODO DE EJECUCIÓN (RUN MODE), permite que el PLC supervise y controle el proceso industrial ejecutando las instrucciones del programa cargado. Adicionalmente, ciertos modelos incorporan un tercer modo llamado MODO DE MONITOREO (MONITOR MODE), que posibilita observar en tiempo real el funcionamiento del PLC mientras permanece en modo de ejecución, facilitando así el diagnóstico y la verificación del sistema.

2. 2. 12 Comunicación MODBUS

La conexión entre dispositivos se realiza mediante un bus de comunicación, que puede ser de tipo semidúplex (como RS485 o fibra óptica) o de tipo dúplex completo (como RS422, corriente de bucle de 0-20 mA o fibra óptica). La transmisión de datos se efectúa de forma asíncrona y puede alcanzar velocidades que varían entre 75 y 19,200 baudios. La distancia máxima entre nodos depende del medio utilizado, pudiendo extenderse hasta 1200 metros sin la utilización de repetidores.

La norma RS485 establece un sistema de comunicación en bus para transmisión serie de tipo multipunto, en el que múltiples dispositivos pueden recibir datos mientras uno de ellos transmite. Esta comunicación opera en modo

semidúplex, lo que implica que los equipos pueden alternar entre envío y recepción, pero no realizar ambas acciones simultáneamente. El sistema utiliza un par trenzado de conductores de cobre que transporta una señal diferencial, lo que brinda inmunidad frente a interferencias electromagnéticas y permite cubrir distancias considerables sin degradación significativa de la señal. (Siemens, sf)

Figura 3

Módulo CM1241 RS485



Nota: Modulo de comunicación Fuente: (snayder 2010)

2. 2. 13 Sensor de temperatura y vibración

Este sensor de vibración de temperatura utiliza chips MEMS de alto rendimiento. Adopte tecnología integrada, tecnología de detección de temperatura y tecnología de detección de vibraciones. Tiene las ventajas de alto rendimiento, bajo consumo de energía y antiinterferencias. Ampliamente utilizado en motores, reductores, generadores, compresores de aire, centrífugas, bombas de agua y otros equipos de medición de vibración de temperatura.

Figura 4

Sensor de temperatura y vibración



Nota. Sensor de medición de la vibración en los ejes x,y , z

2. 2. 14 Pantallas HMI

El desarrollo de la interfaz hombre-máquina (HMI) surgió como respuesta a la necesidad de unificar la supervisión y el control de distintos sistemas remotos, como los controladores lógicos programables (PLC) y otros mecanismos automatizados. Aunque los PLC ejecutan funciones de control predefinidas de forma autónoma, su dispersión en diferentes puntos de la planta complica la recolección manual de datos. En este contexto, los sistemas SCADA fueron concebidos para realizar esta tarea automáticamente. Es importante resaltar que, históricamente, los PLC no contaban con una forma estandarizada de mostrar la información al operador.

Las plataformas HMI modernas permiten conectarse con bases de datos para ofrecer funcionalidades como visualización de tendencias, datos de diagnóstico, gestión de la información, programación de mantenimientos, acceso a información logística, esquemas técnicos de sensores o equipos específicos, e incluso sistemas expertos para la resolución de fallos operativos.



Desde finales de la década de 1990, especialmente a partir de 1998, los principales fabricantes de PLC han incorporado la capacidad de integrar sus dispositivos con entornos HMI/SCADA. Esta evolución ha favorecido el uso de protocolos de comunicación abiertos, facilitando la compatibilidad entre equipos. Asimismo, diversos desarrolladores de software HMI/SCADA independientes ofrecen soluciones compatibles con una amplia variedad de PLC del mercado.

Los sistemas de Interfaz Hombre-Máquina (HMI) se han convertido en herramientas cada vez más comunes dentro del entorno industrial. Esta creciente adopción responde a la demanda de mejorar el control sobre las variables de producción y de disponer de información crítica del proceso en tiempo real. Estos dispositivos permiten una interacción eficiente entre el operador y los sistemas automatizados, facilitando la supervisión y el ajuste oportuno de los parámetros operativos.

En la actualidad, el sector industrial ofrece una extensa variedad de sistemas HMI, diseñados para responder a distintos grados de complejidad y requerimientos operativos. Estos dispositivos están disponibles en múltiples formatos y capacidades, permitiendo su adaptación a tareas simples o a procesos industriales de alta exigencia.

Hoy en día, los sistemas HMI han evolucionado hasta incluir plataformas cliente-servidor versátiles, lo que les permite integrarse tanto en entornos SCADA eléctricos como en sistemas de control de procesos o instalaciones industriales de menor escala. Una de sus principales fortalezas radica en su capacidad de configuración personalizada según las necesidades específicas de cada aplicación. No obstante, es fundamental asegurar que los operarios cuenten con la capacitación necesaria para utilizarlos de forma eficiente y segura.

Los sistemas HMI se han incorporado de manera orgánica en los entornos de producción, ganando gran aceptación en el mercado debido a su utilidad en el diagnóstico de fallos y en la provisión de una visualización clara de los procesos. Una de sus principales ventajas es la capacidad de facilitar la toma de decisiones en tiempo real, mediante el acceso a diversos indicadores clave del sistema. (Siemens, 2017)

EL panel de confort de SIMATIC HMI incluye características de vanguardia en toda la gama. Debido a que pueden controlarse mediante tacto o teclado e incluyen pantallas de alta resolución y panorámicas que varían en tamaño de 4" a 22", son ideales para una variedad de aplicaciones.

Figura 5

Paneles de gama Comfort de Simatic HMI. Siemens

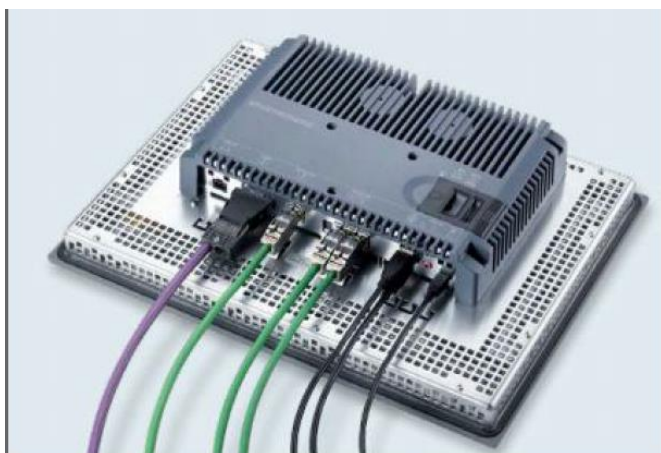


Nota: (Siemens, 2017)

Los tableros Comfort son aptos para almacenar suficiente energía para completar de manera adecuada todos los archivos abiertos y generar una copia de respaldo RDB de sus datos en caso de un corte de energía. Esto garantiza que todos los datos del archivo se conservarán sin necesidad de una serie de procesos de mantenimiento estrictos. (Siemens, 2017)

Figura 6

Vista trasera de un Panel de la gama Comfort de Simatic HMI



Nota: Pantalla para la visualización HMI Fuente: (Siemens, 2017)

Frente al incremento de la competencia a nivel global, la optimización de procesos se ha convertido en una estrategia esencial para reducir el costo total de propiedad (TCO), acelerar el tiempo de comercialización y asegurar altos niveles de calidad. Alcanzar un balance entre calidad, plazos y costos se ha vuelto un elemento clave para la competitividad en la industria, especialmente al aprovechar todas las oportunidades que surgen a lo largo del ciclo de vida de una máquina o instalación.

En este contexto, la plataforma Totally Integrated Automation ha sido diseñada para cubrir de forma eficiente todos los requerimientos posibles de automatización. Esta solución no solo es compatible con normas internacionales, sino que también permite la integración con sistemas de otros proveedores. Su arquitectura de sistema proporciona respuestas completas para cada área del proceso automatizado, sustentándose en un extenso portafolio de productos.

En la actualidad, SIMATIC se posiciona como líder global en el ámbito de la automatización, lo cual se atribuye, en gran medida, a que integra de forma

coherente las seis características esenciales del concepto Totally Integrated Automation (TIA).

Figura 7

Software Tia portal V16



Nota: (Siemens, 2017)

A continuación, se detallan las funciones más relevantes del software que será empleado a lo largo de las distintas prácticas:

La suite SIMATIC proporciona un entorno de desarrollo integral que acompaña eficientemente todas las etapas del ciclo de vida de una máquina o sistema. Desde la concepción y diseño inicial, pasando por la configuración y programación, hasta la implementación, operación y eventual actualización, esta plataforma integra herramientas que optimizan cada fase del proceso.

Una de las ventajas más destacadas de esta plataforma es la integración completa y la interoperabilidad entre sus interfaces, lo que asegura la consistencia de los datos a lo largo de todo el flujo de trabajo de ingeniería. En este contexto, el TIA Portal (Totally Integrated Automation Portal) representa la propuesta de Siemens para consolidar el paradigma de automatización industrial, al reunir en un solo entorno aplicaciones clave como SIMATIC STEP 7, SIMATIC WinCC y SINAMICS StartDrive.



Gracias a SIMATIC, se logra una comunicación plenamente integrada, brindando transparencia desde el nivel de campo hasta las capas de control y gestión empresarial, facilitando así una supervisión completa del sistema.

La línea SIMATIC Safety Integrated proporciona soluciones certificadas que facilitan la conformidad con estándares internacionales como la norma IEC 62061 hasta el nivel SIL 3, la EN ISO 13849-1 hasta el nivel de rendimiento PL y la antigua EN 954-1.

Al integrar las funciones de seguridad directamente en los equipos estándar, se requiere únicamente un único controlador, una sola periferia, una plataforma de ingeniería y un sistema de bus unificado.

Esto permite aprovechar todas las ventajas del sistema y las funcionalidades ampliadas de SIMATIC incluso en aplicaciones que requieren medidas de seguridad. La solución Safety Integrated facilita la incorporación de funciones de protección en maquinaria e instalaciones de forma sencilla y eficiente.

El incremento del uso de Ethernet en entornos industriales, incluso a nivel de campo, ha hecho que los aspectos de ciberseguridad cobren una relevancia fundamental. Para salvaguardar integralmente una planta industrial, se requiere implementar una serie de medidas de protección escalonadas que aborden tanto el acceso físico como lógico a la red y sus dispositivos.

Para el uso industrial exigente, se propone una estrategia de protección basada en celdas, implementada mediante los módulos SCALANCE y los elementos de la línea Security Integrated. Esta arquitectura busca garantizar la integridad de los sistemas ante amenazas externas, reforzando la seguridad desde el nivel más básico de operación.



Los dispositivos de la familia SIMATIC han sido desarrollados bajo estrictos estándares internacionales, y cuentan con certificaciones que avalan su fiabilidad. Sus especificaciones incluyen tolerancias amplias frente a variaciones de temperatura, resistencia a impactos y vibraciones, así como una alta compatibilidad electromagnética, en conformidad con las normas de calidad de Siemens.

Además, el entorno SIMATIC permite realizar tareas tecnológicas como conteo, medición, regulación y control de movimiento (Motion Control), todo ello sin interrupciones y en diversas combinaciones. Estas funciones pueden integrarse de forma fluida y estandarizada dentro del ecosistema SIMATIC, facilitando así el desarrollo de soluciones tecnológicas avanzadas.

Para maximizar la disponibilidad del sistema, Siemens ofrece esquemas de redundancia que abarcan todos los niveles de la instalación, desde el campo hasta la gestión empresarial, asegurando la continuidad operativa incluso en situaciones críticas.

2. 2. 16 Variador de control de frecuencia

Los dispositivos electrónicos conocidos como variadores de velocidad cambian la velocidad alterando la frecuencia de acuerdo con el porcentaje requerido. El suministro de voltaje con el que funcionan estos variadores de frecuencia oscila entre 220 y 3800 V, así como entre 380 y 480 V. El variador de frecuencia facilita la modificación de la velocidad del motor al cambiar la frecuencia de la tensión aplicada.

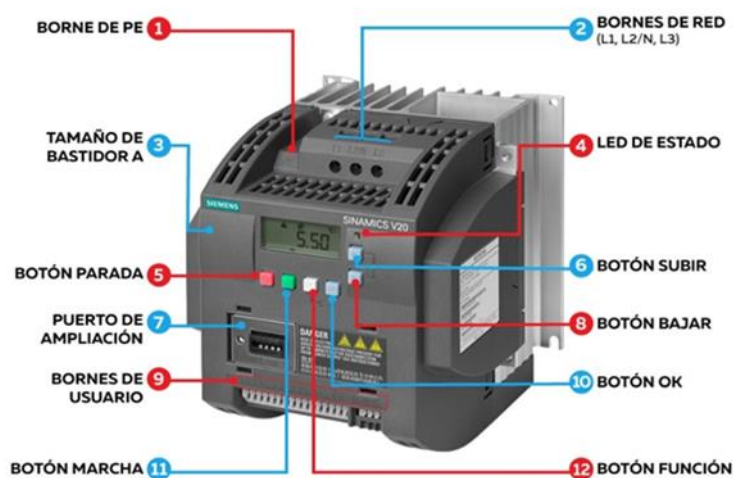
SINAMICS V20

Para este tipo de aplicaciones, ofrece una solución de accionamiento sencilla y asequible. Se distingue por su rentabilidad, durabilidad, comodidad de uso y rápida instalación. Con modelos que van desde los 0,12 kW hasta los 15 kW y

apropiados para tensiones de red monofásicas y trifásicas, su pequeño tamaño lo hace perfecto para una gran variedad de aplicaciones. El SINAMICS V20 es ideal para automatizar operaciones básicas con requisitos cambiantes, por lo que un número cada vez mayor de fabricantes de instalaciones y equipos están optando por hacerlo.

Figura 8

Variador de velocidad Sinamics V20



2. 2. 17 Vibraciones mecánicas

(Gutiérrez & Serna, 2014) Se entiende por vibraciones a los desplazamientos repetitivos que experimentan las partículas de un cuerpo elástico en torno a su punto de equilibrio, manifestándose como una alteración periódica en su magnitud. Este comportamiento oscilatorio se genera cuando una partícula transmite su energía cinética a las adyacentes, provocando la aparición de fuerzas elásticas que sustentan el movimiento. En cuanto a la sensibilidad humana, el rango de percepción de estas vibraciones abarca desde velocidades efectivas cercanas a los 10^{-5} m/s (límite inferior de detección) hasta 1 m/s, nivel en el cual se presenta incomodidad o dolor físico.



Vibración Mecánica: Se refiere al movimiento oscilatorio que experimenta un objeto o sistema.

Oscilación: Consiste en el desplazamiento repetitivo de una variable física en torno a un punto medio, con una frecuencia determinada.

La definición de vibración mecánica contempla tanto a un cuerpo individual como a un sistema, debido a que si un objeto por sí solo no presenta capacidad para vibrar, puede combinarse con otros elementos y conformar un sistema vibratorio. Un ejemplo representativo es el sistema masa-resorte, en el cual la masa aporta energía cinética mientras que el resorte proporciona la fuerza restauradora que permite el movimiento oscilatorio.

Es fundamental señalar que, para que un sistema pueda vibrar, debe contar como mínimo con un componente inercial que almacene energía cinética y otro restaurador que concentre energía potencial. Aunque habitualmente se considera que los elementos restauradores son de naturaleza elástica, existen configuraciones donde dicho componente no es estrictamente elástico y aun así se genera vibración. Un caso típico es el del péndulo, en el cual la fuerza gravitacional actúa como el elemento restaurador del sistema.

En este sentido, cuando un cuerpo entra en estado vibratorio, es crucial identificar el origen de dicha vibración. Esto implica determinar si el fenómeno se produce como consecuencia de las características propias del sistema, tras una perturbación momentánea y en ausencia de una excitación continua, o si, por el contrario, obedece a la presencia de fuerzas externas persistentes que inducen y mantienen el movimiento oscilatorio del sistema.

Por ello, resulta fundamental analizar las distintas clases de perturbaciones responsables del comportamiento vibratorio de un sistema. Estas perturbaciones,

denominadas excitaciones, pueden agruparse según su naturaleza en diversas categorías:

a) Instantánea y b) Permanente.

Una perturbación de tipo instantánea se caracteriza por manifestarse de forma repentina y desaparecer casi de inmediato, algunos ejemplos serían:

El impacto sobre una lámina metálica

La vibración al pulsar las cuerdas de una guitarra

La deformación inicial inducida en un sistema masa-resorte tras un impulso

El efecto vibratorio originado por una colisión

Este tipo de excitación puede manifestarse ya sea como un impulso inicial o como un desplazamiento desde la posición de equilibrio. Por ejemplo, una persona en un columpio puede iniciar su oscilación al ser empujada desde la posición de reposo o simplemente al ser desplazada hacia atrás y soltada.

En contraste, una excitación permanente es aquella que persiste durante todo el movimiento del cuerpo, manteniéndose activa de forma continua mientras se produce la vibración.

La vibración se presenta como un movimiento oscilatorio detectable y medible en la superficie de una máquina, así como en sus elementos estructurales o en la base sobre la que se encuentra instalada.

Estas vibraciones por sí solas se originan cuando existe movimiento en masas, ya sean de tipo rotacional u oscilante. En el ámbito industrial, las principales fuentes de vibración en las máquinas son los mecanismos rotativos o de movimiento alternativo, cuyas fuerzas generadas se transmiten a través de los rodamientos o cojinetes hasta la carcasa y, finalmente, a las estructuras de soporte.

Es importante comprender que la vibración no constituye una causa en sí misma, sino un indicio de la presencia de un defecto mecánico dentro del equipo. Para evaluar este fenómeno, se recurre a parámetros definidos basados en el movimiento, siendo esencial considerar los patrones de oscilación y los criterios establecidos para su medición (Cfr. Barajas P. O. M., 2013).

2. 2. 18 Consecuencias de las Vibraciones.

Las vibraciones que se presentan en máquinas y estructuras suelen ser indeseadas, ya que incrementan los esfuerzos mecánicos y tensiones internas, lo que provoca una disminución del rendimiento del equipo y un aumento del consumo energético necesario para mantener su operación. Estas vibraciones también generan desgaste prematuro de los materiales, daños estructurales por fatiga, así como movimientos y ruidos molestos durante el funcionamiento.

Si bien todos los sistemas mecánicos poseen propiedades elásticas, de amortiguamiento y resistencia al movimiento, dichas propiedades solo se mantienen en condiciones normales de operación, respetando los parámetros de diseño. En la práctica, los elementos más afectados por la vibración suelen ser los rodamientos, ya que son los encargados de soportar las cargas dinámicas del equipo. Esta afectación puede observarse directamente en el deterioro de las pistas y de los componentes rodantes.

Figura 9

Vibraciones en rodamientos



Nota: Defectos en rodamientos

2. 2. 19 Tipos de vibraciones mecánicas.

El propósito esencial del análisis y diagnóstico de las condiciones de una máquina es establecer las acciones correctivas necesarias para disminuir las vibraciones no deseadas y, por ende, reducir las fuerzas vibratorias innecesarias. Por ello, al examinar los datos obtenidos, se debe enfocar la atención en identificar las amplitudes predominantes de la vibración, analizar sus posibles causas y aplicar las correcciones correspondientes que eliminen el problema detectado.

Vibración por desbalance.

Una adecuada interpretación de los datos requiere conocimiento de las diversas fuentes de vibración y sus efectos. Entre las causas más frecuentes se encuentra el desbalance, el cual suele ser provocado por la pérdida de material debido a corrosión o por la acumulación de suciedad en las piezas móviles. Estos factores generan una distribución irregular de la masa en los componentes rotativos. En diversas situaciones, los registros obtenidos en presencia de un desbalance reflejan lo siguiente:

1. La frecuencia de vibración se presenta en correspondencia directa con una vez la velocidad de rotación (1x rpm) del componente que presenta desbalance.
2. La magnitud de la vibración está directamente relacionada con el grado de desbalance presente.
3. La mayor intensidad vibratoria tiende a observarse en el plano radial, ya sea en dirección horizontal o vertical, especialmente en equipos con ejes horizontales.
4. El estudio de fase muestra una respuesta consistente y estable.



5. Al rotar el sensor 90 grados, se produce un desplazamiento de fase del mismo valor.

Importante: Cuando un rotor presenta desbalance en voladizo, suele generar vibraciones de gran amplitud tanto en el eje axial como en el radial

Vibración por falta de alineamiento.

En la mayoría de los equipos utilizados en entornos industriales, se distingue una sección eléctrica responsable de producir el movimiento y otra sección mecánica encargada de ejecutar una función determinada. La conexión entre ambas debe realizarse con precisión, no solo para minimizar las vibraciones, sino también para evitar un consumo energético elevado por parte del motor.

Para lograrlo, es fundamental considerar los tres planos espaciales (X, Y y Z), asegurando que exista un alineamiento paralelo adecuado entre los componentes acoplados.

En la mayoría de situaciones, los registros obtenidos cuando existe una desalineación suelen reflejar lo siguiente:

1. La frecuencia propia de vibración suele presentarse en una vez la rotación por minuto (1x rpm); sin embargo, cuando el grado de desalineación es severo, también pueden detectarse frecuencias armónicas como 2x y 3x rpm.

2. Existe una relación directa entre la magnitud de la vibración y el nivel de desalineación del sistema, es decir, a mayor desalineación, mayor amplitud vibratoria.

3. La vibración no solo se manifiesta en el eje radial, sino que también puede alcanzar niveles significativos en el eje axial.

4. Los análisis de fase evidencian inestabilidad en las lecturas cuando hay problemas de alineamiento, lo cual complica la identificación precisa de la causa.

Para tener en consideración: Incluso cuando se emplean acoplamientos flexibles, la desalineación en un sistema rotativo genera esfuerzos tanto en dirección radial como axial, los cuales se traducen en vibraciones en ambos sentidos.

Vibración por Excentricidad.

Una causa habitual de vibración en equipos rotativos es la excentricidad, entendida no como una deformación ovalada, sino como la discrepancia entre el eje de rotación real y el eje geométrico del rotor, lo que implica que ambos no comparten un mismo centro.

La excentricidad representa una causa frecuente de desbalance, originada por una distribución desigual de masa alrededor del eje de rotación, con mayor peso concentrado en un lado respecto al centro.

Una estrategia para distinguir entre un desbalance mecánico y una excentricidad en motores consiste en registrar la vibración con el filtro desactivado mientras el motor opera con carga. Al interrumpir la alimentación eléctrica, si la amplitud de la vibración disminuye de forma paulatina mientras el rotor continúa girando por inercia, es indicativo de un desbalance. Por el contrario, si la vibración cesa de manera inmediata al cortar la corriente, el origen del problema sería de tipo eléctrico, probablemente asociado a una excentricidad en el inducido.

La excentricidad presente en rodetes o rotores de equipos como ventiladores, sopladores, bombas y compresores también puede generar vibraciones. En estas situaciones, las fuerzas vibratorias se originan debido a

desequilibrios en las fuerzas aerodinámicas o hidráulicas que inciden de manera desigual sobre el rotor.

Inestabilidad vibratoria causada por deterioro en rodamientos y chumaceras.

Niveles anómalamente altos de vibración generados por cojinetes de chumacera en mal estado suelen estar relacionados con una holgura excesiva, la cual puede ser provocada por desgaste mecánico debido a fricción continua o por efectos de erosión química. Asimismo, factores como aflojamientos estructurales, por ejemplo, desprendimiento del revestimiento metálico y deficiencias en la lubricación también contribuyen a este tipo de vibraciones.

a. Cuando un cojinete de chumacera presenta una holgura superior a la permitida, incluso defectos menores como un desbalance leve, una ligera desalineación u otras fuentes de vibración pueden amplificarse considerablemente. Esta condición favorece la aparición de aflojamientos mecánicos que, a su vez, generan impactos repetitivos conocidos como efectos de machacado.

En situaciones como esta, el rodamiento no constituye la fuente directa de la vibración; sin embargo, su presencia con una holgura adecuada contribuiría significativamente a reducir la magnitud de dicha vibración.

Con frecuencia, un rodamiento de chumacera dañado puede ser detectado por el fenómeno de "barrido" al analizar las diferencias de amplitud vibratoria entre los ejes horizontal y vertical. En un estado operativo normal, los equipos montados sobre una base o estructura rígida tienden a exhibir una amplitud de vibración algo superior en el eje horizontal.

b. Holgura excesiva de los rodamientos.



c. Torbellino de aceite

Esta clase de vibración aparece exclusivamente en equipos que utilizan rodamientos de chumacera con lubricación a presión y que funcionan a altas velocidades, generalmente por encima de la segunda velocidad crítica del motor.

La vibración generada por los torbellinos de aceite tiende a presentar una intensidad considerable, aunque se distingue con facilidad debido a su frecuencia inusual. Esta ocurre típicamente en un rango ligeramente inferior al 50% de la velocidad de giro del eje, situándose típicamente entre el 46 % y el 48 % de las rpm del mismo.

El fenómeno de los torbellinos de aceite suele originarse por un diseño inadecuado del rodamiento, un desgaste excesivo del mismo, un incremento en la presión del lubricante o una variación en la viscosidad del aceite utilizado.

Es posible aplicar soluciones temporales al problema ajustando la temperatura del aceite para modificar su viscosidad, generando intencionalmente un pequeño desbalance o una ligera desalineación con el fin de incrementar la carga sobre el eje, o realizando ranuras o raspados laterales en el rodamiento para interrumpir la formación de la cuña de lubricante.

Por supuesto, una medida más permanente consiste en sustituir el rodamiento por uno cuyo diseño se adecúe apropiadamente a las condiciones de operación de la máquina, o por un modelo que minimice el riesgo de generación de torbellinos de aceite.

Los rodamientos con ranuras axiales están diseñados con canales distribuidos de manera uniforme en tres puntos, lo que incrementa su capacidad para resistir la formación de torbellinos de aceite. No obstante, esta configuración



suele utilizarse únicamente en aplicaciones de menor escala, como turbinas de gas de baja potencia y turbocargadores.

Los rodamientos de chumacera con diseño de lóbulos ofrecen una mayor estabilidad frente a la aparición de torbellinos de aceite, ya que generan tres zonas de alta presión en la película lubricante que actúan como puntos de centrado para el eje rotativo.

Los rodamientos tipo riñón basculante son frecuentemente empleados en maquinaria industrial de gran tamaño que opera a elevadas velocidades.

Existen dos factores frecuentes que pueden provocar la formación de torbellinos de aceite en un rodamiento de chumacera:

1. Vibraciones generadas por equipos cercanos: Estas pueden propagarse hacia el rodamiento de chumacera mediante elementos estructurales sólidos como tuberías o bases. Este efecto se denomina torbellino inducido por el exterior.

2. Vibración generada por componentes internos de la propia máquina: Ante la presencia de una vibración típica de torbellino de aceite, es imprescindible llevar a cabo una evaluación exhaustiva de las vibraciones en toda la instalación. Esta debe incluir tanto las fuentes de vibración cercanas como las estructuras de cimentación y las tuberías asociadas. De esta forma, podría identificarse una causa externa responsable del fenómeno del torbellino de aceite.

Elementos Rodantes Defectuosos.

Las fallas en las pistas, bolas o rodillos de los rodamientos generan vibraciones de alta frecuencia, cuya frecuencia no necesariamente guarda una relación entera con la velocidad de rotación del eje. La magnitud de estas vibraciones está directamente relacionada con la severidad del daño presente en el rodamiento.

Falla de Rodamientos – Otras causas

Los rodamientos no sufren fallos anticipados a menos que estén sometidos a fuerzas externas, las cuales suelen coincidir con las causas que generan vibraciones en el sistema.

- Principales factores que provocan fallas en los rodamientos:
- Sobrecarga del sistema
- Desalineación de componentes
- Imperfecciones en los asientos del eje o en los orificios del alojamiento
- Procedimientos de montaje inadecuados
- Ajustes inapropiados en la instalación
- Lubricación deficiente o errónea
- Fallos en el sistema de sellado
- Daños por brinelación falsa (deformaciones por carga estática)
- Paso de corriente eléctrica a través del rodamiento

Vibración por lubricación inadecuada.

El desajuste mecánico y el impacto repetitivo que genera suelen inducir vibraciones a una frecuencia equivalente al doble de las revoluciones por minuto ($2x$), e incluso a múltiplos superiores de dicha velocidad.

Las vibraciones pueden originarse por pernos de fijación flojos, por presencia de juego excesivo en los rodamientos o por la existencia de grietas en la estructura o en el pedestal de apoyo del equipo.

El patrón vibratorio asociado al aflojamiento mecánico generalmente no se origina por sí solo, sino que es provocado por otra fuente de excitación, como el desbalance o una desalineación. No obstante, el aflojamiento intensifica significativamente el efecto de estos problemas, amplificando vibraciones que, en



condiciones normales, serían de menor magnitud. En ese sentido, puede afirmarse que el aflojamiento mecánico actúa como un factor agravante, incrementando la severidad de las vibraciones producidas por fallos ya existentes.

Vibración por Aflojamiento Mecánico.

El desajuste mecánico y el impacto repetitivo que genera suelen inducir vibraciones a una frecuencia equivalente al doble de las revoluciones por minuto (2x), e incluso a múltiplos superiores de dicha velocidad.

Las vibraciones pueden originarse por pernos de fijación flojos, por presencia de juego excesivo en los rodamientos o por la existencia de grietas en la estructura o en el pedestal de apoyo del equipo.

El patrón vibratorio asociado al aflojamiento mecánico generalmente no se origina por sí solo, sino que es provocado por otra fuente de excitación, como el desbalance o una desalineación. No obstante, el aflojamiento intensifica significativamente el efecto de estos problemas, amplificando vibraciones que, en condiciones normales, serían de menor magnitud. En ese sentido, puede afirmarse que el aflojamiento mecánico actúa como un factor agravante, incrementando la severidad de las vibraciones producidas por fallos ya existentes.

Vibración por Bandas de Accionamiento.

Las bandas en "V" son comúnmente empleadas en sistemas de transmisión mecánica debido a su eficiente capacidad para mitigar impactos, choques y vibraciones durante la operación.

Los inconvenientes vibratorios relacionados con el uso de bandas en 'V' se agrupan comúnmente en función de:



La banda puede responder a fuerzas externas generadas por otros componentes del equipo, lo que produce alteraciones en su funcionamiento.

También pueden generarse vibraciones debido a defectos o fallas inherentes a la propia banda.

Las bandas en "V" suelen identificarse como una fuente común de vibraciones, ya que es fácil observar cómo se sacuden o saltan entre las poleas. Por ello, sustituir las bandas suele ser una de las primeras acciones correctivas ante problemas de vibración.

No obstante, en muchas ocasiones la banda simplemente responde a otras fuerzas perturbadoras presentes en el sistema mecánico. En estas situaciones, actúa como un indicador de vibraciones anómalas sin ser la causa directa del problema. La clave para identificar el origen de la anomalía radica en la frecuencia de la vibración observada. Si la banda responde a una fuerza externa como el desbalance o la excentricidad en las poleas, su frecuencia vibratoria coincidirá con la de dicha perturbación. Esto permite que el componente causante del fallo se perciba como inmóvil al ser iluminado con una luz estroboscópica durante el análisis.

Vibración por Problemas de Engranaje.

Las vibraciones derivadas de fallas en engranajes suelen ser fácilmente identificables, ya que generalmente se manifiestan con una frecuencia correspondiente a la frecuencia de engrane. Esta se obtiene multiplicando el número de dientes del engranaje por las revoluciones por minuto del componente defectuoso.



Entre los problemas más frecuentes en los engranajes que generan vibración a la frecuencia de engrane se encuentran: el desgaste avanzado de los dientes, defectos en su conformación geométrica, fallos en el sistema de lubricación, así como la presencia de partículas extrañas alojadas entre los dientes.

No todos los defectos en engranajes provocan vibraciones cuya frecuencia coincide con la frecuencia de engrane. Por ejemplo, si un engranaje presenta un único diente roto o deformado, la vibración resultante puede aparecer a una frecuencia equivalente a $1x$ las rpm. Al observar la señal en un osciloscopio conectado a un analizador, se pueden identificar impulsos característicos que permiten distinguir este tipo de falla de otras que también producen vibraciones en esa misma frecuencia. En caso de que existan múltiples dientes defectuosos, la frecuencia de vibración aumentará en proporción al número de imperfecciones.

La amplitud y la frecuencia de la vibración generada por los engranajes también pueden mostrar un comportamiento inestable en ciertas ocasiones. Este tipo de vibración errática suele presentarse cuando el sistema de engranajes opera bajo cargas muy ligeras. En tales situaciones, la carga tiende a transferirse de manera irregular entre los engranajes, provocando oscilaciones no constantes en el sistema.

2. 2. 20 Medición de la vibración

El uso del análisis y la medición de vibraciones, junto con otras metodologías de mantenimiento, se ha extendido ampliamente en diversas industrias como herramienta para el diagnóstico de fallas y la evaluación de la integridad mecánica de máquinas y estructuras.

Una de las principales ventajas de esta técnica, en comparación con métodos tradicionales como los ensayos por tintas penetrantes, ultrasonido o



radiografías, radica en que puede aplicarse con los equipos en operación. Esto permite realizar el análisis sin necesidad de interrumpir los procesos productivos, evitando así pérdidas asociadas a paradas no planificadas.

2. 2. 21 Parámetros de medición y análisis de vibración.

La señal vibratoria puede ser descompuesta y evaluada considerando sus tres componentes fundamentales: aceleración, velocidad y desplazamiento, cada una proporcionando información específica sobre el comportamiento dinámico del sistema.

Traslación (amplitud): Se define como la distancia entre la posición instantánea de una partícula en vibración y su punto de equilibrio. En general, se hace referencia a su valor máximo. Unidad: metros (m)

Velocidad: Representa la rapidez con la que la partícula vibra. Corresponde a la primera derivada del desplazamiento respecto al tiempo. Unidad: metros por segundo (m/s).

Aceleración: Expresa el cambio de velocidad por unidad de tiempo, siendo la segunda derivada del desplazamiento temporal. Unidad: metros por segundo al cuadrado (m/s^2).

El análisis del desplazamiento vibratorio resalta principalmente las frecuencias bajas, mientras que la evaluación a través de la aceleración enfatiza con mayor intensidad las frecuencias elevadas.

Al analizar el espectro de vibraciones de un equipo, es recomendable utilizar el parámetro que presente una respuesta más equilibrada a lo largo de todo el espectro de frecuencias, ya que esto permite maximizar el rango dinámico de la señal registrada.

En la mayoría de los equipos rotativos de tamaño medio, se observa que el parámetro de velocidad de vibración genera un espectro más homogéneo; por ello, se adopta comúnmente como la variable predeterminada para el monitoreo de maquinaria.

El criterio de selección del sensor depende significativamente del tipo de parámetro a medir: aceleración, velocidad o desplazamiento. En general, el monitoreo por desplazamiento resulta más adecuado para equipos de baja velocidad, mientras que para maquinaria de alta velocidad, la aceleración proporciona una evaluación más precisa del comportamiento vibratorio.

Todo ello se puede lograr siempre que se opte por el sensor más adecuado, cuya elección debe basarse en criterios técnicos específicos, tales como:

- La amplitud de la señal que se desea medir
- La temperatura de la superficie donde se instalará
- El espectro de frecuencias que se pretende captar con precisión
- El sensor o transductor constituye el punto de partida en el proceso de medición y debe reflejar con precisión las propiedades de la variable física que se busca cuantificar. Se trata de un dispositivo electrónico diseñado para detectar una magnitud física específica y transformarla en una señal eléctrica ya sea en forma de voltaje o corriente que guarda una relación proporcional con el valor medido.

2. 2. 22 Clases de sensores de vibraciones

a. Sensores de desplazamiento

El transductor de corrientes de Eddy, también denominado proxímetro, es comúnmente utilizado para la detección de frecuencias bajas, específicamente aquellas inferiores a 1.000 Hz.

Este tipo de sensor se utiliza para monitorear el desplazamiento radial o axial de los ejes, y suele colocarse en las cubiertas de los rodamientos o en zonas cercanas, con el propósito de registrar el movimiento relativo entre el eje y la estructura fija. Los sistemas de proximidad que funcionan mediante corrientes de Eddy incorporan tanto el sensor como el acondicionador de señal, ofreciendo una respuesta en frecuencia de alto rendimiento. Gracias a ello, permiten realizar mediciones precisas tanto de vibraciones como de posición, sin un límite inferior claramente establecido.

Resulta fundamental distinguir entre los sensores que detectan el desplazamiento mediante contacto directo y aquellos que lo hacen sin necesidad de contacto físico.

Ventajas

- Registra el movimiento relativo que ocurre entre la punta del sensor y el eje en rotación.
- Permite capturar simultáneamente la señal de componente continua y la señal oscilante asociada a las vibraciones.

La señal de corriente continua proporciona datos sobre la ubicación del eje en relación con el cojinete examinado, mientras que la componente alterna entrega detalles sobre la forma de onda y el espectro vibratorio, facilitando así el análisis y seguimiento de posibles fallas mecánicas.

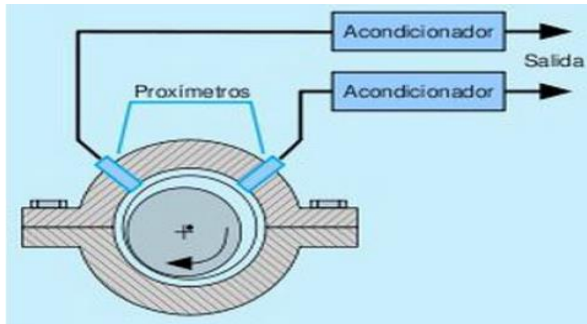
Desventajas

- El intervalo de frecuencias está relativamente restringido en comparación con otros transductores modernos, siendo típicamente lineal entre 0 y 1.000 Hz.
- Se requiere un acondicionador de señal.

- Pueden generar lecturas erróneas debido a factores tanto eléctricos como mecánicos; inclusive pequeñas grietas en el eje podrían ser detectadas por el sensor como altos niveles de vibración. sensor como altos niveles de

Figura 10

Sensor de movimiento o desplazamiento



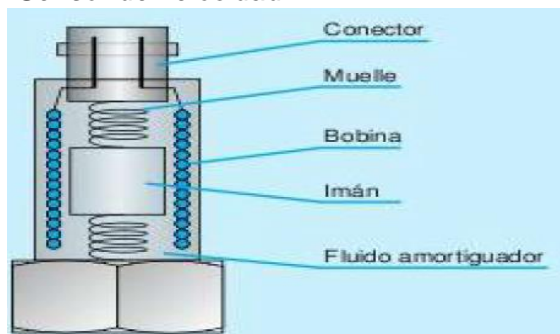
Nota. www.sinaes.es/sensores/transductores_desplazamiento.html

b. Sensor de velocidad o velocímetro:

Estos dispositivos se emplean en maquinaria donde las vibraciones del eje se transfieren a la carcasa con poca atenuación, provocando así elevadas amplitudes. Están conformados por un imán permanente situado en el interior de una bobina de cobre; al vibrar la carcasa, se genera un desplazamiento relativo entre el imán y el bobinado, induciendo una señal eléctrica proporcional a la velocidad del desplazamiento conforme al principio de inducción electromagnética de Faraday.

Fi **Figura 12**

Sensor de velocidad



Nota. www.sinaes.es/sensores/transductores_desplazamiento.html



Ventajas

Captura de forma directa la velocidad del movimiento, la cual guarda una relación proporcional con la velocidad vibratoria del sistema.

No necesita una fuente de alimentación adicional, lo que facilita la transmisión de señales eléctricas a través de largas distancias mediante cableado, siendo especialmente adecuado para instalaciones en las que el centro de control se encuentra alejado del punto de medición o actuación.

Desventajas

Este tipo de transductor posee un tamaño considerable, lo que requiere el uso de bases magnéticas de gran tamaño para su correcta fijación. Como resultado, su rango de operación en frecuencia se ve algo limitado, abarcando típicamente de 10 a 1.000 Hz.

La posición en la que se realiza la medición, ya sea en orientación vertical u horizontal del transductor, puede influir en la señal obtenida, generando variaciones en el orden del 5 al 10 %.

La señal generada por el transductor está influenciada por la temperatura; a medida que esta aumenta, la salida del sensor disminuye debido al debilitamiento del campo magnético.

c. Sensor de aceleración o acelerómetro

Los acelerómetros son los instrumentos más utilizados para evaluar vibraciones en maquinaria industrial. De hecho, su presencia es estándar en los equipos portátiles de recolección de datos, aunque en muchas aplicaciones la señal generada suele ser integrada para expresarse en términos de velocidad.

Se dispone de diversos tipos de acelerómetros, siendo el más utilizado el de tipo piezoeléctrico con amplificador integrado. Este tipo de sensor se instala

externamente, por lo general sobre el soporte de los cojinetes o en la zona específica de la máquina que se desea supervisar.

Este tipo de sensor genera una señal eléctrica proporcional a la aceleración, aprovechando la presión que se ejerce sobre un cristal piezoeléctrico. Gracias a esta tecnología, los acelerómetros pueden captar con precisión señales en un amplio espectro de frecuencias, que abarca desde 1 Hz hasta 15.000 Hz, lo que los convierte en una opción ideal para la detección de vibraciones de alta frecuencia.

Hay transductores diseñados específicamente para detectar frecuencias extremadamente bajas o excepcionalmente altas. No obstante, la precisión en la adquisición de datos a frecuencias elevadas depende en gran medida del tipo de montaje utilizado para fijar el sensor a la estructura de la máquina.

Ventajas

La mayoría de estos sensores opera dentro de un rango de frecuencia amplio, que usualmente se extiende desde los 2 Hz hasta los 15.000 Hz.

Estos sensores se caracterizan por su diseño compacto, ausencia de partes móviles, peso liviano y dimensiones reducidas.

El transductor del tipo ICP (Integrated Circuit Piezoelectric) incorpora un acondicionador de señal en su interior. Aunque ICP es una marca registrada de PCB Piezotronics Inc., en la práctica se utiliza como denominación genérica para aquellos acelerómetros que cuentan con amplificador integrado, también conocidos como acelerómetros en modo voltaje.

Desventajas

Cuando se emplea en configuraciones tipo "hand-held" o mediante una varilla de contacto ("stinger") para la medición de altas frecuencias, la respuesta del

sensor se ve notablemente reducida a partir de los 1.200 Hz, lo que limita su efectividad en ese rango.

La señal de salida se expresa en unidades de aceleración, por lo que es necesario aplicar una integración para convertirla en una representación espectral o en el valor global de la amplitud correspondiente a la velocidad.

Figura 13

Sensor de aceleración



Nota. www.sinaes.es/sensores/transductores_desplazamiento.html.

2. 2. 23 Unidades para la medición de vibraciones.

Para efectuar una medición precisa de la vibración, es fundamental identificar las variables involucradas: la frecuencia y la amplitud, ambas dependientes del tiempo.

Frecuencia: Todo movimiento periódico o armónico se comporta según las propiedades de una función periódica, lo que implica la existencia de una constante T , denominada período, tal que la posición en el tiempo $x(t)$ se repite en $x(t+nT)$, donde n es un número entero positivo (1, 2, 3, 4,...). En consecuencia, el período puede interpretarse como el intervalo temporal necesario para completar un ciclo entero del movimiento. Por su parte, la frecuencia de oscilación, que es el inverso del período, indica cuántas veces se repite dicho ciclo dentro de un determinado intervalo de tiempo,

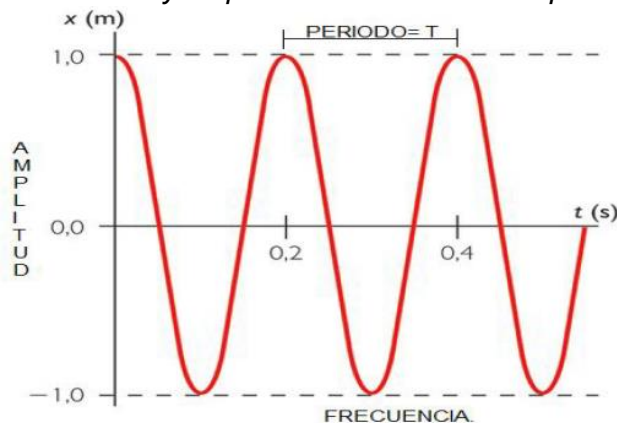
Amplitud: En una señal armónica, el valor más alto que alcanza la oscilación se denomina amplitud. Si esta se mide desde la línea de referencia o nivel de equilibrio hasta el punto máximo de la onda, se conoce como amplitud de pico. En cambio, si la medición se realiza considerando la distancia total entre el valor máximo positivo y el valor mínimo negativo, se le llama amplitud de pico a pico.

En el entorno industrial, estos parámetros se aplican para registrar el comportamiento vibratorio de una máquina, y estos incluyen:

- La oscilación en términos de desplazamiento
- La rapidez del movimiento vibratorio
- La variación de la velocidad vibratoria
- El ángulo de desfase respecto a una referencia

Figura 14

Frecuencia y amplitud en función del tiempo



Nota. <http://www.dliengineering.com/vibmanspanish/parametrosdemedicindevibracin.htm>.

El desplazamiento vibratorio suele cuantificarse como valor de pico a pico, utilizando comúnmente unidades como milésimas de pulgada (mils), equivalentes a 0.001 pulgadas, o micrómetros, equivalentes a 0.001 milímetros.

La velocidad de la vibración se mide típicamente en valores pico, y se expresa comúnmente en unidades como pulgadas por segundo (in/seg) o milímetros por segundo (mm/seg).

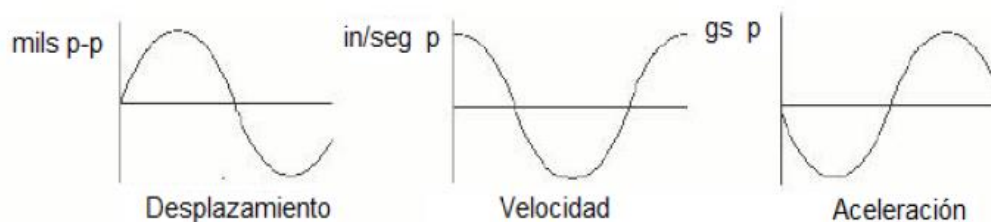
En cuanto a la aceleración de la vibración, esta suele medirse en términos de pico a pico, utilizando como unidad el "g", donde 1 g equivale a 980.665 cm/s^2 , correspondiente a la aceleración gravitacional estándar.

La fase corresponde a la comparación entre dos señales de medición, expresando el desfase angular entre ellas. Usualmente, se representa como el ángulo que separa las formas de onda que describen el movimiento en dos ubicaciones distintas.

Estos parámetros se ilustran con claridad en la figura 9, donde se evidencia que el desplazamiento y la velocidad presentan un desfase de 90° , al igual que la relación entre la velocidad y la aceleración. Además, se observa que la aceleración está desfasada 180° respecto al desplazamiento.

Figura 15

Unidades de medición de las vibraciones



Nota. <http://vibraciones.net23.net>

El desplazamiento vibratorio suele cuantificarse como valor de pico a pico, utilizando comúnmente unidades como milésimas de pulgada (mils), equivalentes a 0.001 pulgadas, o micrómetros, equivalentes a 0.001 milímetros.

La velocidad de la vibración se mide típicamente en valores pico, y se expresa comúnmente en unidades como pulgadas por segundo (in/seg) o milímetros por segundo (mm/seg).

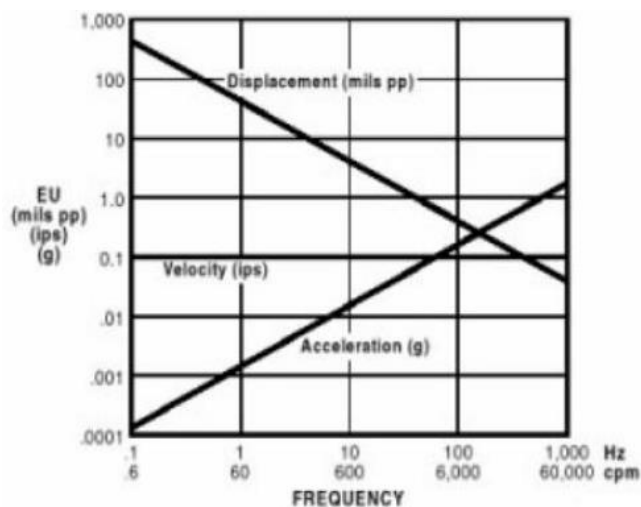
En cuanto a la aceleración de la vibración, esta suele medirse en términos de pico a pico, utilizando como unidad el "g", donde 1 g equivale a 980.665 cm/s^2 , correspondiente a la aceleración gravitacional estándar.

La fase corresponde a la comparación entre dos señales de medición, expresando el desfase angular entre ellas. Usualmente, se representa como el ángulo que separa las formas de onda que describen el movimiento en dos ubicaciones distintas.

Estos parámetros se ilustran con claridad en la figura 9, donde se evidencia que el desplazamiento y la velocidad presentan un desfase de 90° , al igual que la relación entre la velocidad y la aceleración. Además, se observa que la aceleración está desfasada 180° respecto al desplazamiento.

Figura 16

Interrelación de unidades de medición de

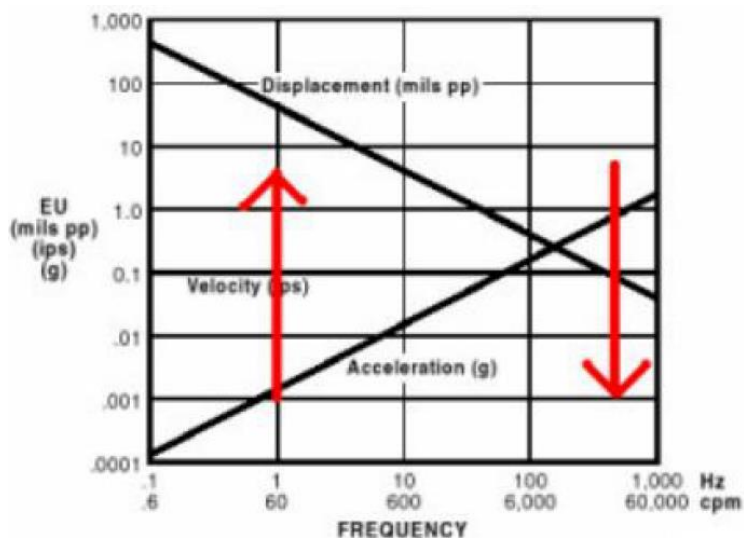


Nota. www.tav.net/transductores/medida-vibraciones-sensores.pdf.

Todos los sensores presentan restricciones tanto físicas como electrónicas, por lo que su instalación debe realizarse de forma adecuada y alineada con los cálculos previamente establecidos. Estas consideraciones se manifiestan en los resultados obtenidos al integrar señales, ya sea de aceleración a velocidad o de velocidad a desplazamiento. En este proceso, las señales de baja frecuencia requieren amplificación, mientras que las de alta frecuencia deben atenuarse para obtener mediciones precisas y confiables.

Figura 17

Interpretación de unidades de medición de vibraciones



Es posible efectuar los cálculos mediante las siguientes expresiones matemáticas:

$$\text{Velocidad} = 2 \cdot \pi \cdot F \cdot D = \pi \cdot F \cdot A / 2 \quad (2)$$

$$\text{Aceleración} = 2 \cdot \pi \cdot F \cdot V = (2 \cdot \pi \cdot F)^2 \cdot D \quad (3)$$

donde= D=Desplazamiento, valor pico (mm)

F= Frecuencia (Hz ó CPS)

V= Velocidad (mm/seg)

A= Aceleración (mm/seg)



Todos los valores presentados corresponden a magnitudes de pico; para convertirlos a valores RMS se debe multiplicar por 0.707, y por 2 si se desea obtener valores pico a pico. (Cfr. Analista de vibración – Nivel I, 2013).

2. 2. 24 Medición de la vibración local en línea

En el ámbito industrial, los procesos de manufactura involucran el uso de maquinaria especializada de alta complejidad y relevancia, cuya falla repentina podría generar pérdidas significativas tanto a nivel de equipo como en la continuidad de la producción.

Existen diversas estrategias aplicadas dentro del mantenimiento predictivo, siendo el análisis de vibraciones una de las más relevantes. Este análisis implica la supervisión continua del estado del equipo, la cual puede efectuarse a intervalos programados —según la criticidad del activo, los requerimientos del proceso productivo o el plan de mantenimiento— o de manera ininterrumpida, mediante monitoreo permanente las 24 horas del día.

Lo primero que debe establecerse es el objetivo principal que motivará la puesta en marcha de un sistema de monitoreo de vibraciones, considerando que en este proceso deben participar activamente las áreas directamente implicadas, como Producción y Mantenimiento.

La disminución en los gastos asociados al mantenimiento representa una oportunidad para incrementar la rentabilidad de la empresa, así como para destinar recursos adicionales a nuevas inversiones

Ventajas del análisis de vibraciones.

- Disminución significativa en gastos de mantenimiento.
- Detección oportuna de fallos incipientes en los equipos, previniendo reparaciones más costosas.



- Sustitución de rutinas ineficientes mediante la identificación de prácticas deficientes de mantenimiento.
- Optimización de la planificación y ejecución de los programas de mantenimiento.
- Reducción de horas extra del personal técnico, disminuyendo costos laborales.
- Mejora en la calidad de las intervenciones técnicas realizadas.
- Menor necesidad de mantener grandes inventarios de repuestos.
- Eliminación de tareas preventivas innecesarias, reduciendo intervenciones superfluas.
- Aumento de la productividad.
- Mejora de las condiciones de seguridad para el personal.
- Disminución de interrupciones inesperadas por fallos técnicos.
- Revalorización del activo productivo por mayor eficiencia operativa anual.
- Prolongación de la vida útil de las máquinas manteniendo estándares de calidad.
- Reducción de pérdidas de materia prima durante los procesos.
- Incremento de la confiabilidad operativa, facilitando el cumplimiento de los compromisos productivos.

Los beneficios derivados de la disminución en los costos de mantenimiento y el aumento en la producción pueden traducirse directamente en mayores utilidades para la empresa.

El análisis de vibraciones no puede efectuarse en cualquier punto del equipo, ya que existen zonas específicas que proporcionan mediciones más precisas y representativas del estado real de la maquinaria.



En primer lugar, es fundamental identificar los denominados puntos de prueba. El transductor debe colocarse lo más próximo posible a los rodamientos, asegurándose de que exista un contacto con metal sólido entre el rodamiento y el sensor. No se debe instalar el transductor directamente sobre el rodamiento, ni sobre las llamadas gorras de rodamiento, ya que estas últimas están fabricadas con metal delgado y presentan una baja capacidad para transmitir la energía vibratoria de forma eficaz.

El avance de la electrónica y los sistemas computacionales ha facilitado considerablemente la adopción de nuevas metodologías para el análisis de señales, con aplicaciones en una amplia gama de procesos industriales. En este contexto, se implementará dicha técnica para capturar, procesar y evaluar las vibraciones generadas por uno de los equipos de clarificación de la planta Buencafé Liofilizado de Colombia. El objetivo es establecer un sistema de diagnóstico de fallas en tiempo real, que pueda ser supervisado y/o controlado de manera remota a través de una red Intranet, utilizando la plataforma Intouch como entorno de desarrollo.

2. 2. 25 Análisis de vibración

Para determinar la severidad de la vibración en una máquina, resulta esencial seleccionar la variable de movimiento más apropiada —ya sea desplazamiento, velocidad o aceleración— considerando tanto la norma técnica de referencia como el rango de frecuencias involucrado en el análisis. Esta elección garantiza una evaluación precisa del estado operativo del equipo y permite aplicar criterios objetivos para su diagnóstico. Esta elección tiene como objetivo establecer criterios de evaluación específicos para cada tipo de equipo, determinando cómo deben realizarse las mediciones y cómo deben interpretarse los datos obtenidos.



Asimismo, se definen las condiciones de operación que debe mantener la máquina durante el ensayo, asegurando la validez y comparabilidad de los resultados.

Tipos de Normas.

Dependiendo del enfoque y la finalidad de su aplicación, es posible distinguir diversas normas técnicas vinculadas al análisis de vibraciones, entre las que se destacan:

Las normas internacionales emitidas por la ISO (International Standards Organization) son ampliamente reconocidas y se consideran de máxima relevancia en el contexto de transacciones internacionales. En la práctica, constituyen el referente inicial para evaluar la severidad de las vibraciones mecánicas en equipos y sistemas. Sin embargo, una de las principales limitaciones de estas normas es su enfoque general, lo que puede dificultar su aplicación directa en casos específicos donde se requieren criterios más detallados o adaptados a condiciones particulares de operación.

Recomendaciones de los fabricantes.

Los fabricantes suelen establecer directrices sobre los niveles de vibración aceptables en los equipos que producen. Estas recomendaciones, en su mayoría, están enfocadas en turbomaquinaria; sin embargo, es cada vez más común que se solicite esta información como requisito al momento de adquirir maquinaria crítica, debido a su importancia en el mantenimiento predictivo y la integridad operativa.

El desarrollo de normativas internas sobre vibraciones es altamente recomendable, ya que permiten una mejor adaptación a las condiciones y características específicas de los equipos de cada planta industrial. Si bien su elaboración representa uno de los desafíos más complejos dentro del mantenimiento predictivo, los beneficios obtenidos a mediano plazo justifican el

esfuerzo. Para implementarlas eficazmente, la organización debe disponer de personal capacitado y con certificación técnica; de no ser así, será necesario recurrir a servicios externos especializados, lo cual implica un mayor costo.

2. 2. 26 Normas empleadas para la medición de la criticidad de la vibración

Carta de Rathbone.

Aunque no constituye una norma propiamente dicha, esta guía ha sido ampliamente aceptada en el ámbito industrial. Su origen se remonta a la década de 1930 y ha sido perfeccionada con el paso del tiempo.

Esta carta cuenta con una escala logarítmica de frecuencia expresada en Hertz o RPM, y otra escala logarítmica para amplitudes, ya sea en desplazamiento (pico o pico a pico) o en velocidad. Estas escalas permiten determinar de forma directa el nivel de severidad de la vibración.

Aunque esta carta es ampliamente utilizada, presenta ciertas limitaciones, como, por ejemplo:

No considera características específicas del equipo, como su tipo, la potencia nominal o la rigidez de sus anclajes.

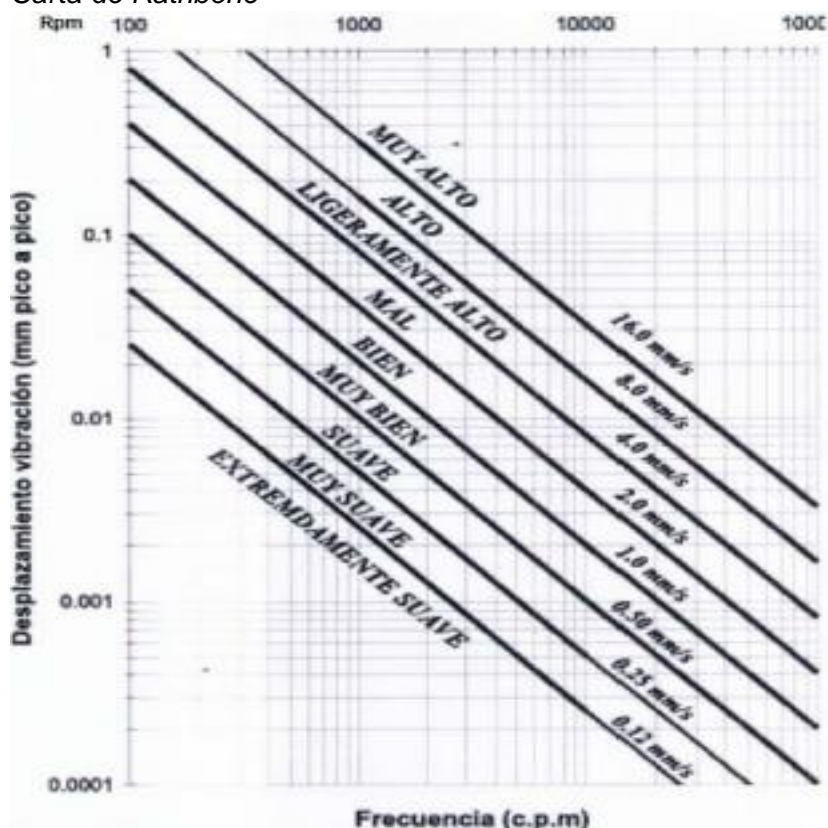
Su aplicabilidad se restringe a máquinas rotativas, resultando inadecuado para equipos alternativos u otros sistemas industriales.

A medida que aumenta la frecuencia, la amplitud de vibración en desplazamiento debe ser menor para mantener un mismo nivel de severidad. Por ejemplo, una vibración de 100 micras pico a pico a 300 cpm puede considerarse aceptable, pero esa misma amplitud a 4.000 cpm indicaría una condición crítica. Esto se debe a que las vibraciones de baja frecuencia son menos dañinas que las de alta frecuencia, razón por la cual fallas en engranajes y rodamientos que suelen manifestarse a altas frecuencias resultan especialmente peligrosas.

Por esta razón, las vibraciones de baja frecuencia se cuantifican usualmente en términos de desplazamiento, mientras que las de alta frecuencia se miden en velocidad o aceleración. La carta de Rathbone, desarrollada originalmente para equipos de baja velocidad de rotación, ha quedado desactualizada frente a las exigencias modernas de análisis vibracional.

Figura 18

Carta de Rathbone



<http://www.sinais.es/normativa/rathbone.html>

Norma ISO 2372 de 1974.

Esta norma permite evaluar el estado vibracional de maquinaria que opera en un rango de velocidad de entre 100 y 200 revoluciones por segundo, es decir, entre 6.000 y 12.000 revoluciones por minuto (RPM).

Los datos necesarios para aplicar esta norma incluyen el nivel global de vibración medido en velocidad, expresado como valor eficaz (RMS), dentro de un

rango de frecuencia comprendido entre 10 y 1000 Hz. Además, es fundamental clasificar adecuadamente el tipo de equipo rotativo que se está evaluando.

Clase I: Equipos pequeños de hasta 15 kW, normalmente montados sobre soportes rígidos

Clase II: Equipos medianos, con potencias entre 15 y 75 kW, también sobre soportes rígidos

Clase III: Equipos grandes con potencias mayores a 75 kW montados en cimentaciones rígidas, o desde 300 kW con cimentaciones especiales.

Clase IV: Turbomaquinaria (equipos cuya velocidad de operación supera su velocidad crítica).

Para aplicar la norma ISO 2372, se debe identificar la clase a la que pertenece la máquina evaluada y, una vez determinado el nivel global de vibración en un rango de 600 a 60 000 cpm, ubicar dicho valor en la tabla correspondiente para conocer la zona de severidad en la que se sitúa

Figura 19

Tabla de severidad de vibración según norma ISO 2372

(mm/s, rms)	Clase I	Clase II	Clase III	Clase IV	
0,18 a 0,28	A				A Buena
0,28 a 0,45					
0,45 a 0,71					
0,71 a 1,12					
1,12 a 1,8	B			A Buena	B Satisfactoria
1,8 a 2,8					
2,8 a 4,5	C		B Satisfactoria	B Satisfactoria	
4,5 a 7,1					
7,1 a 11,2	D			C Inatisfactoria	D Inaceptable
11,2 a 18					
18 a 28					

Nota. <http://www.sinai.es/normativa/rathbone.html>



Norma ISO 10816 de 1995.

Esta norma define los métodos y condiciones para medir y evaluar las vibraciones, enfocándose en mediciones realizadas sobre superficies no giratorias de las máquinas. Su enfoque principal radica en la supervisión del funcionamiento durante la operación y en pruebas de validación, con el propósito de asegurar la confiabilidad operativa a largo plazo. Cabe señalar que esta normativa sustituye a las antiguas ISO 2372 e ISO 3945, que fueron utilizadas previamente para el análisis de vibraciones mecánicas en equipos que operaban entre 10 y 200 revoluciones por segundo. La norma ISO 10816 se estructura en cinco secciones principales, cada una enfocada en un tipo específico de maquinaria:

Sección 1: Proporciona lineamientos generales para la evaluación de vibraciones.

Sección 2: Está dirigida a turbinas de vapor y generadores con una capacidad superior a 50 MW, operando a velocidades estándar como 1500, 1800, 3000 y 3600 RPM.

Sección 3: Se aplica a equipos industriales con una potencia nominal mayor a 15 kW y rangos de velocidad entre 120 y 15 000 RPM.

Sección 4: Considera conjuntos impulsados por turbinas de gas, exceptuando aquellos utilizados en aeronáutica.

Sección 5: Corresponde a máquinas utilizadas en plantas hidroeléctricas y sistemas de bombeo.

Los criterios establecidos por este estándar se orientan a conjuntos de máquinas con una potencia superior a 15 kW y que operan en un rango de velocidad entre 120 y 15 000 RPM. Es importante destacar que dichos criterios se enfocan exclusivamente en las vibraciones generadas por la propia máquina,



excluyendo aquellas que provienen de fuentes externas. Para evaluar el estado operativo del equipo, se emplea el valor eficaz (RMS) de la velocidad de vibración, el cual puede ser obtenido con la mayoría de los instrumentos convencionales de medición de vibraciones.

Las mediciones deben efectuarse una vez que el rotor y los cojinetes principales hayan alcanzado su temperatura estable de operación, y con la máquina trabajando bajo condiciones nominales y específicas, es decir, velocidad, caudal, presión y carga según lo establecido, lo que permitirá determinar adecuadamente su voltaje.

En el caso de máquinas que operan con velocidad y carga variables, las mediciones deben realizarse bajo todas las condiciones en las que se prevea que funcionarán por periodos prolongados. Los valores máximos obtenidos en estas condiciones serán considerados como representativos del nivel de vibración. Si dichos valores superan los límites establecidos por el criterio técnico y se sospecha la presencia de una vibración de fondo excesiva, se recomienda efectuar nuevas mediciones con la máquina detenida, a fin de evaluar la magnitud de dicha interferencia. Si se constata que, estando la máquina parada, la vibración supera el 25 % del valor registrado con la máquina en funcionamiento, será necesario implementar medidas correctivas para mitigar el impacto de esta vibración externa.

La severidad de la vibración se determina en función de diversos criterios, entre los cuales destacan:

- La clase de máquina analizada.
- La potencia nominal o la altura del eje
- El grado de rigidez o flexibilidad del sistema de soporte.



2. 2. 27 Normas para certificación en análisis de vibraciones mecánicas.

Entre las normativas relacionadas con el análisis de la severidad de la vibración, también se incluyen aquellas destinadas a la certificación del personal encargado de realizar las mediciones y el análisis de datos. La más destacada en este ámbito es la norma ISO 18436.

La norma ISO 18436-2:2003 establece los lineamientos para la formación y certificación del personal encargado del monitoreo de condiciones de maquinaria y del diagnóstico basado en el análisis de vibraciones. Esta normativa reconoce formalmente las competencias y habilidades necesarias para llevar a cabo mediciones precisas de vibraciones, ya sea mediante sensores portátiles o fijos instalados en los equipos, garantizando así la fiabilidad de los datos obtenidos y la calidad del análisis realizado.

La obtención de la certificación conforme a esta norma requiere aprobar progresivamente sus cuatro niveles, los cuales acreditan diferentes grados de competencia:

Categoría I: Certifica a quienes están capacitados para realizar mediciones de vibraciones utilizando instrumentos de un solo canal, además de interpretar espectros básicos en ciertos tipos de maquinaria.

Categoría II: Reconoce a los profesionales aptos para efectuar mediciones y análisis básicos de vibraciones en máquinas industriales, siguiendo procedimientos previamente establecidos.

Categoría III: Avala a quienes poseen la competencia para realizar mediciones con equipos multicanal, seleccionar técnicas de análisis adecuadas y diseñar programas de monitoreo de vibraciones.

Categoría IV: Acredita a los especialistas con la capacidad de dirigir y ejecutar cualquier tipo de medición y análisis de vibraciones, así como proponer medidas correctivas, interpretar normas y recomendaciones del fabricante, y establecer criterios de aceptación y alarma.

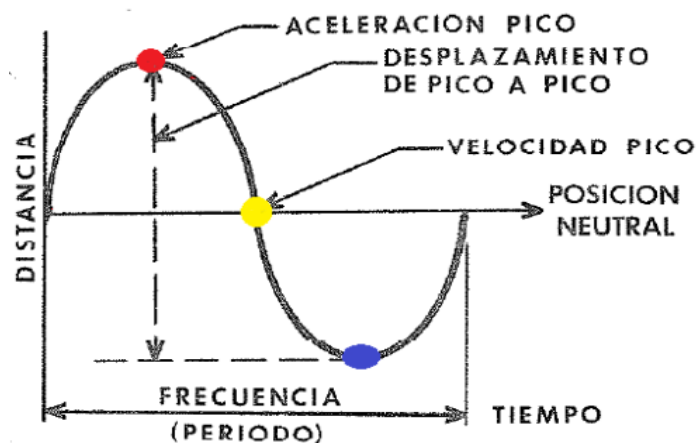
Parámetros de la vibración.

Un aspecto crucial al abordar el tema de las vibraciones es determinar la severidad de la vibración, ya que esta refleja el nivel de criticidad de una posible falla en la máquina. Aunque la amplitud de la vibración puede proporcionar una indicación de la magnitud del problema, establecer límites precisos de vibración que permitan identificar con certeza una avería resulta complejo, debido a la diversidad de tipos de máquinas, condiciones operativas y características estructurales.

Los parámetros comúnmente empleados para evaluar las vibraciones en maquinaria incluyen: frecuencia, amplitud, desplazamiento, velocidad, aceleración y energía de impulsos (también conocida como Spike Energy). Cada uno de estos parámetros proporciona información complementaria sobre el comportamiento dinámico del equipo y ayuda a identificar diferentes tipos de fallas mecánicas.

Figura 20

Parámetros que definen la vibración



Nota. IRD Mechanalysis.

- En la cresta de la onda, se alcanza el valor máximo de aceleración, el cual coincide con el punto donde la velocidad es mínima.

- En el punto medio de la onda, también conocido como posición neutra, se observa el valor más alto de velocidad, mientras que la aceleración alcanza su valor mínimo. Por el contrario, en el extremo inferior de la onda, la velocidad vuelve a ser mínima, y la aceleración alcanza nuevamente un valor máximo.

- Dependiendo del sistema métrico empleado, las unidades utilizadas para medir la vibración pueden variar. Por ello, es crucial seleccionar adecuadamente dichas unidades al comparar los valores obtenidos con las tablas de referencia que clasifican la vibración como buena, aceptable o crítica. Una confusión entre distintas unidades podría conducir a interpretaciones erróneas y diagnósticos incorrectos.

A fin de realizar una comparación adecuada entre los valores de amplitud global, es fundamental que ambas señales se analicen en el mismo intervalo de frecuencias y con un factor de escala uniforme. Este factor puede establecerse mediante el siguiente procedimiento:

RMS (Root Mean Square): o media de la raíz cuadrada, representa la energía contenida en la onda vibratoria. Este parámetro, equivalente al utilizado comúnmente en el ámbito eléctrico, se aplica principalmente en la medición de la aceleración debido a su capacidad para reflejar la intensidad energética de la señal.

Valor pico (Pk o P): Representa el nivel máximo que alcanza la señal de vibración. Es una medida comúnmente empleada para evaluar la velocidad en los estudios de análisis vibracional

Valor Pico a Pico (Pk-Pk ó P-P): Es la diferencia entre los picos positivo y negativo de una señal vibratoria, siendo comúnmente empleada como referencia en la medición del desplazamiento.



Fase de la Vibración

La fase describe el comportamiento de la vibración, ya que permite determinar cómo se desplazan los apoyos de una máquina a una frecuencia específica. Esta se cuantifica en grados angulares mediante el uso de instrumentos como la luz estroboscópica o una célula fotoeléctrica. En esencia, la fase representa la relación de movimiento entre una parte vibrante y un punto fijo de referencia. Por ejemplo, un desfase de 180° indica que ambos elementos están en completa oposición. Cuando dos masas vibran a la misma frecuencia, la diferencia de fase entre ellas se mantiene constante.

Espectro de vibración

El espectro es una representación gráfica de la vibración en función de la frecuencia. En él, el eje Y muestra la amplitud de la vibración —ya sea en términos de desplazamiento, velocidad o aceleración— mientras que el eje X representa la frecuencia, expresada en CPM o Hz. Esta gráfica reúne todas las señales registradas directamente de la máquina, lo que puede dificultar su interpretación debido a la superposición de múltiples componentes. Cada uno de estos aporta una firma vibratoria única, reflejo de sus particularidades geométricas y estructurales, lo que hace que la información contenida esté altamente codificada.

Para llevar a cabo este tipo de análisis, el matemático francés Jean Baptiste Fourier desarrolló un método para descomponer una señal compleja del dominio del tiempo en una serie de ondas sinusoidales, cada una con una amplitud y frecuencia determinadas. Según Fourier, “cualquier forma de onda compleja puede expresarse como una suma de ondas sinusoidales simples, y a su vez, estas pueden combinarse para formar cualquier onda compleja”. Esto fundamenta el análisis de vibraciones mediante la Transformada Rápida de Fourier (FFT, por sus

siglas en inglés), la cual toma la señal proveniente del equipo, descompone sus componentes sinusoidales y representa gráficamente su espectro de frecuencia.

Suma de señales en un espectro de vibración.

Figura 21

FFT de ondas vibratorias

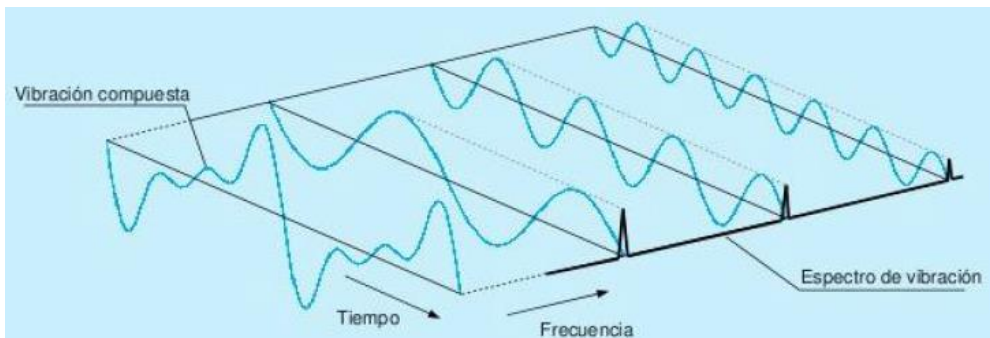
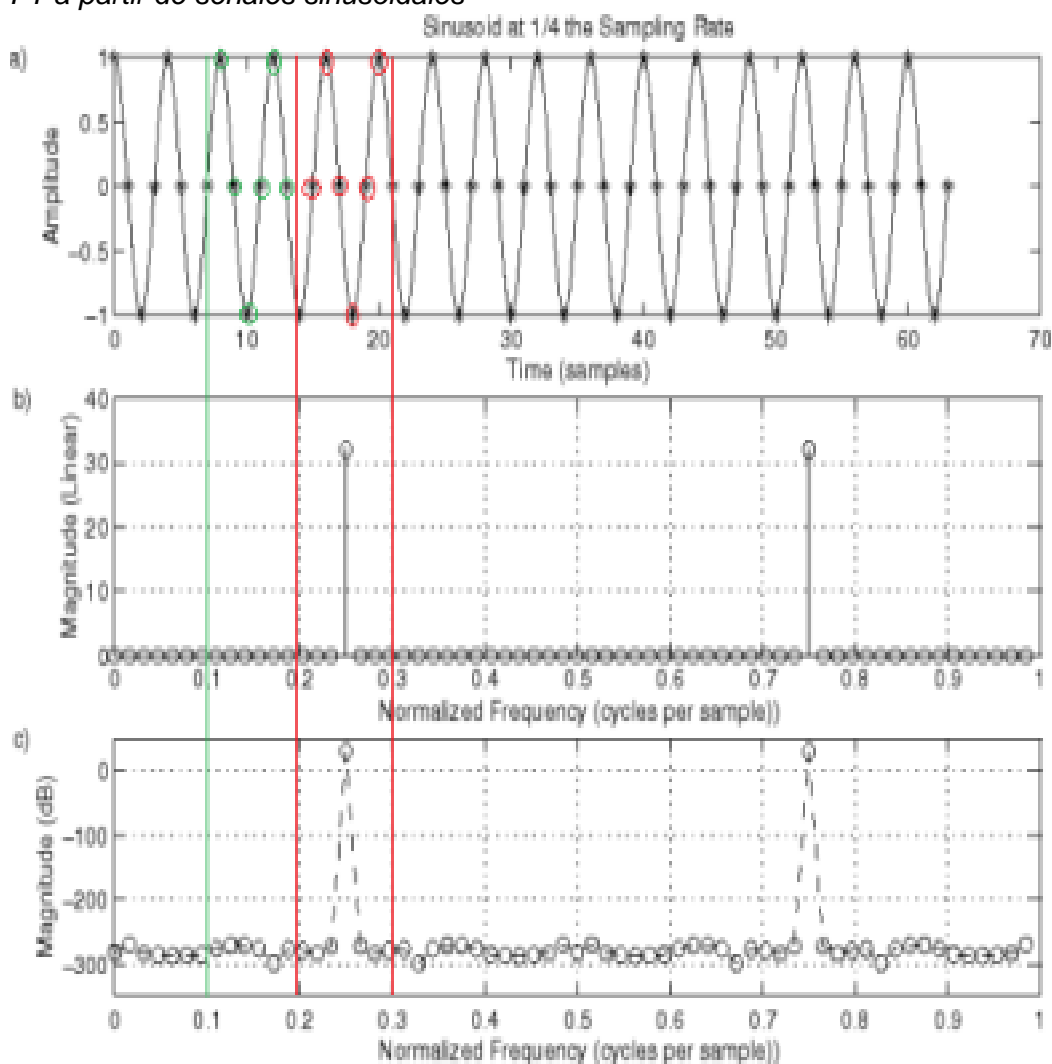


Figura 22

FFT a partir de señales sinusoidales





Diagnóstico de vibraciones según su espectro de vibración.

Para poder detectar una falla mecánica mediante el análisis espectral de vibraciones, es necesario reconocer los elementos básicos del espectro, los cuales se representan gráficamente en la figura 34.

El análisis del espectro vibratorio revela distintos armónicos, que pueden diferenciarse según su amplitud y la frecuencia a la que ocurren. Estos armónicos se dividen en tres categorías:

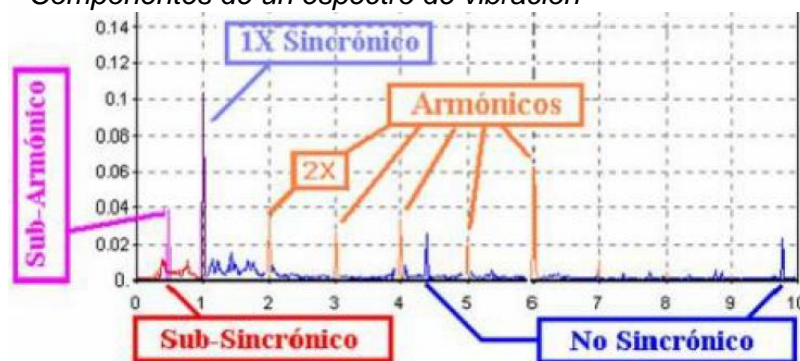
Sincrónicos = Corresponden a frecuencias múltiples exactas de la frecuencia de operación, tales como 1X, 2X, 3X, hasta 6X, 7X, etc.

No sincrónicos = Son aquellos armónicos que aparecen entre los sincrónicos, con valores fraccionarios o decimales, por ejemplo 4.5X o 9.8X.

Sub sincrónico = Comprenden las componentes cuyas frecuencias son inferiores a la frecuencia fundamental de funcionamiento, es decir, menores que 1X.

Más allá de interpretar el espectro de vibraciones, resulta esencial comprender las particularidades comunes de cada componente a evaluar. Esto incluye:

- Los elementos clave del sistema
- Los fundamentos de su funcionamiento
- Las velocidades usuales en las que operan
- Las fallas más frecuentes que pueden presentar

Figura 23*Componentes de un espectro de vibración*

2. 2. 28 Fallas más comunes para equipos rotatorios

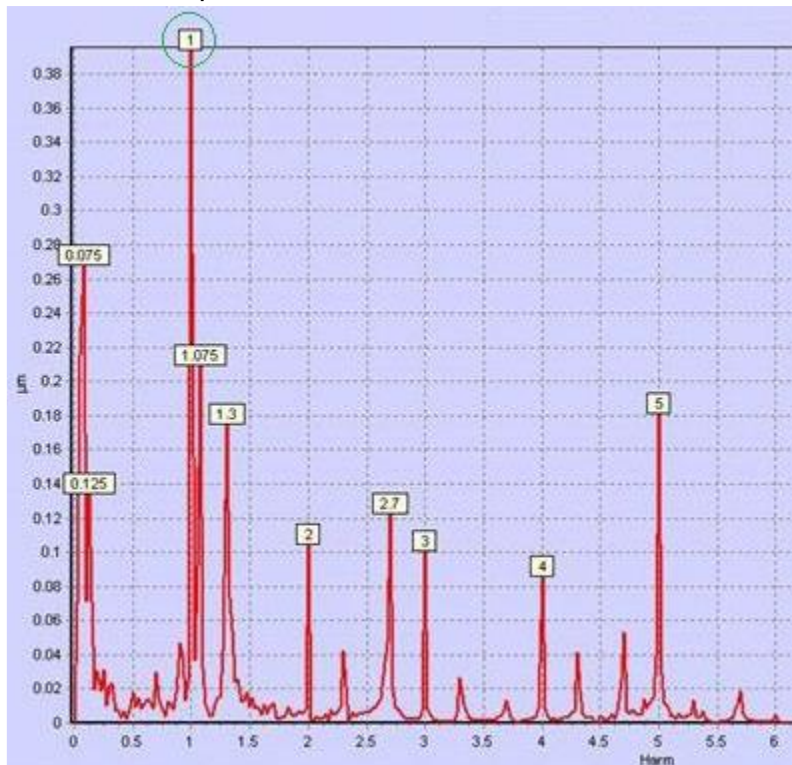
Desbalanceo

Se trata de uno de los problemas de vibración más frecuentes en equipos mecánicos, el cual se manifiesta típicamente mediante elevadas amplitudes en la frecuencia correspondiente a la velocidad de giro del equipo.

Este fenómeno ocurre porque, al girar el rotor, se origina una fuerza centrífuga orientada radialmente hacia el exterior. Dicha fuerza provoca una flexión en el eje del rotor, la cual es transferida posteriormente a los soportes de la máquina.

La fuerza generada presenta un patrón armónico, lo que implica que su representación en el dominio del tiempo adopta una forma senoidal. La frecuencia con la que esta fuerza excita el sistema corresponde directamente a la velocidad de rotación del rotor, es decir, a la frecuencia fundamental o 1X del equipo.

El desbalanceo en los rotores no puede eliminarse por completo; siempre existirá en cierta medida. Lo esencial es mantenerlo dentro de límites tolerables que garanticen el rendimiento adecuado del equipo y la seguridad en las instalaciones de la planta.

Figura 24*Espectro de vibración por desbalance*

Desalineamiento

Se trata de una situación en la que los ejes de la máquina motriz y la máquina accionada no coinciden en una línea central común. Generalmente, este desalineamiento puede clasificarse en dos tipos principales:

Paralelo

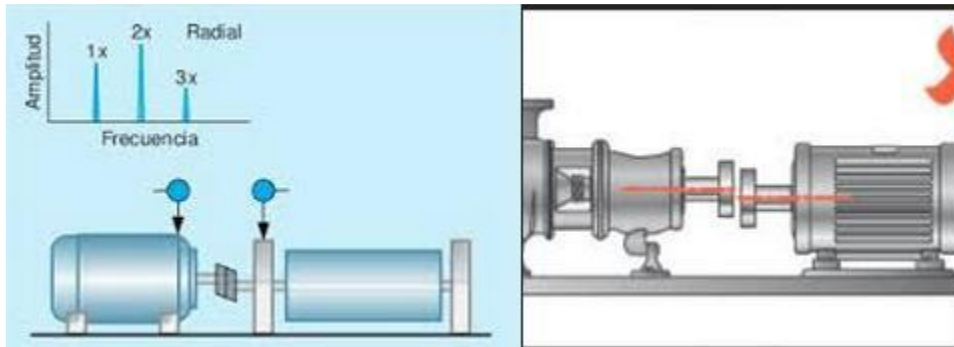
Angular

El desalineamiento genera una flexión en los ejes del equipo motriz y del equipo accionado, lo que incrementa la carga sobre los soportes de la máquina, afectando negativamente la durabilidad de los rodamientos.

De manera similar al desbalance, la desalineación no puede eliminarse por completo. Por ello, los fabricantes suelen sugerir el uso de acoplamientos flexibles, los cuales ayudan a compensar parcialmente la desalineación presente en la máquina.

Figura 25

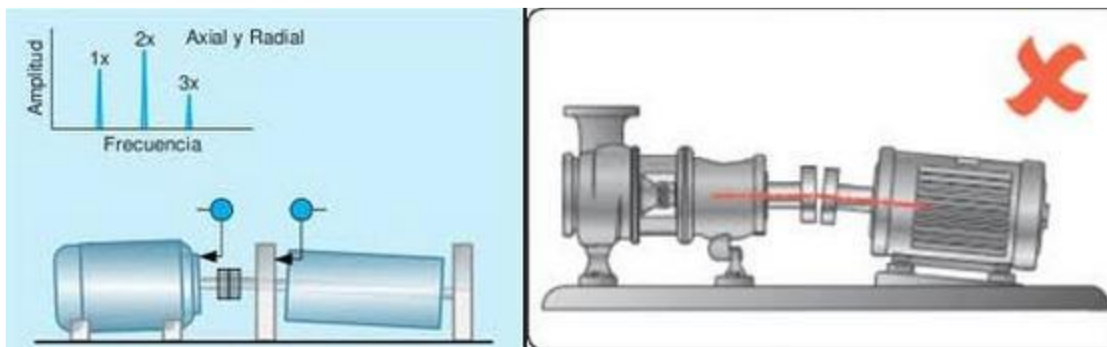
Desalineación Paralela



De manera similar al desbalance, la desalineación no puede eliminarse por completo. Por ello, los fabricantes suelen sugerir el uso de acoplamientos flexibles, los cuales ayudan a compensar parcialmente la desalineación presente en la máquina.

Figura 26

Desalineación Angular



El análisis espectral de vibraciones suele evidenciar armónicos de la frecuencia fundamental (1x), usualmente hasta la tercera. Sin embargo, en casos de desalineación severa, pueden observarse armónicos que alcanzan incluso la 8x. Esta situación podría llevar a confundirla con aflojamientos mecánicos, aunque se puede distinguir entre ambos al examinar el nivel de ruido de fondo en el espectro: dicho nivel tiende a elevarse en el caso de solturas, mientras que la desalineación no suele generar ese efecto.

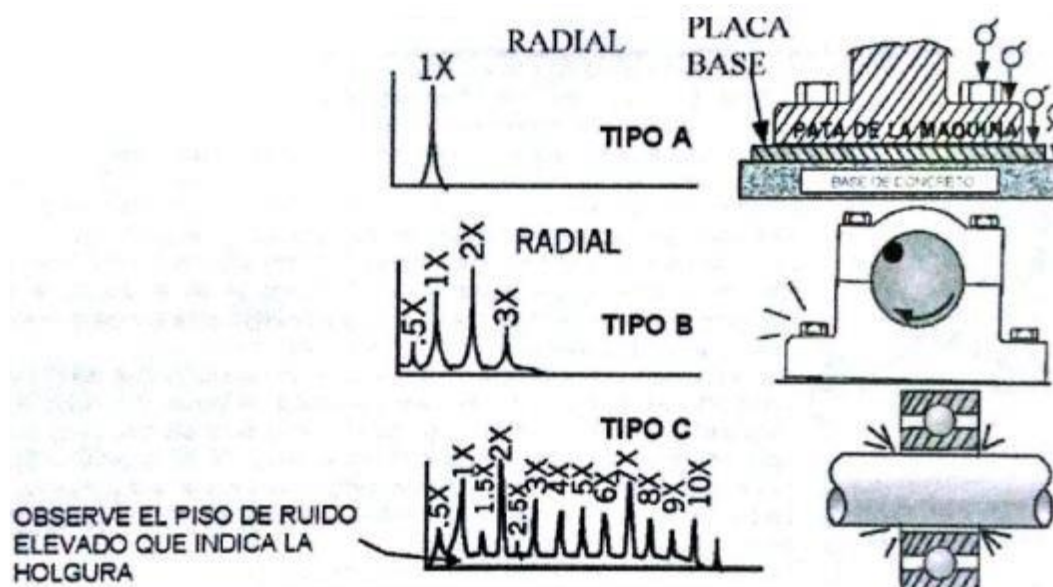
Cuando un rodamiento está montado de forma inclinada, suele producirse una vibración notable en dirección axial. Este defecto induce un movimiento irregular, caracterizado por un desfase cercano a 180° entre los extremos opuestos (superior e inferior, así como derecho e izquierdo) de la carcasa donde se encuentra instalado. Intentar corregir el acoplamiento no resuelve la causa raíz; normalmente, es necesario desmontar el rodamiento y volver a colocarlo adecuadamente.

Soltura Mecánica

Dado que hay diversas formas en que se manifiestan las solturas mecánicas, su presencia en el espectro de vibración suele clasificarse en tres categorías distintas: tipo A, tipo B y tipo C (ver figura 38).

Figura 27

Tipos de holgura mecánica



Nota. Technical Associates of Charlotte.

Tipo A = Tipo A = Este tipo de vibración suele originarse por una debilidad estructural en los cimientos de la máquina, en la placa base o en la propia base de



soporte. Entre las causas más comunes se encuentran el deterioro del mortero, pernos de anclaje flojos o una deformación del bastidor. El análisis de fase puede evidenciar una diferencia angular entre 90° y 180° al comparar las lecturas verticales tomadas desde el perno, la placa base y la base estructural de la máquina.

Tipo B = Habitualmente, esta condición es causada por pernos de fijación sueltos, fisuras en la estructura del bastidor o daños en el pedestal que sostiene el rodamiento.

Tipo C = Este fenómeno suele presentarse por un acoplamiento deficiente entre los componentes, lo que genera múltiples armónicas producto de la respuesta no lineal de las piezas sueltas frente a las fuerzas dinámicas generadas por el rotor. Esta situación provoca una distorsión en la forma de la señal y un aumento del nivel base de ruido en el espectro. Es común que el tipo C se origine por un aro exterior del rodamiento mal asentado en su alojamiento o por un rodamiento flojo que gira libremente sobre su eje.

Las mediciones correspondientes al tipo C suelen presentar una notable variabilidad entre lecturas sucesivas. Esto se debe a que la holgura mecánica posee un comportamiento marcadamente direccional. Al analizar los niveles de vibración en intervalos de 30° en sentido radial a lo largo de la carcasa del rodamiento, se evidencia dicha variación. Asimismo, es importante considerar que esta holgura genera varios subarmónicos, con frecuencias que se manifiestan específicamente en múltiplos fraccionarios de la velocidad de rotación, como $0.5x$, $1.5x$ o $2.5x$ RPM.

2. 2. 29 Definición de Términos

Sistema de Monitoreo de Vibraciones:

Conjunto de dispositivos y software que permite registrar, analizar y visualizar los niveles de vibración mecánica presentes en una máquina o equipo, con el fin de diagnosticar su estado operativo y predecir posibles fallos.

Vibraciones Mecánicas:

Oscilaciones repetitivas de una estructura o componente mecánico en torno a una posición de equilibrio. En el contexto de maquinaria industrial, las vibraciones son indicadores importantes del estado de funcionamiento y pueden ser provocadas por desbalances, desgastes o fallas en componentes.

Despedradora de Quinua:

Máquina empleada en el proceso postcosecha del grano de quinua, cuya función principal es separar las piedras u otras impurezas del producto, utilizando mecanismos que generan vibraciones o movimientos mecánicos controlados.

Sensor de Vibración:

Dispositivo electrónico que mide la aceleración de un objeto en movimiento. En sistemas de monitoreo, se utiliza para captar las vibraciones producidas por una máquina y convertirlas en señales eléctricas que pueden ser analizadas.

Señal de Vibración:

Representación digital o analógica de las variaciones en la aceleración o desplazamiento de una máquina a lo largo del tiempo, utilizada para detectar anomalías o patrones de funcionamiento.

Análisis Espectral:

Técnica de análisis de señales que permite descomponer una señal compleja en sus componentes de frecuencia. Es fundamental en el diagnóstico de vibraciones para identificar el origen de fallas mecánicas específicas.



CAPITULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 Método de investigación

El método más adecuado es el experimental, ya que implica la implementación práctica de un sistema tecnológico para evaluar su efectividad en condiciones reales de operación.

3.2 Tipo de investigación

La investigación es aplicada, ya que busca resolver un problema técnico específico mediante la implementación de un sistema de monitoreo en una máquina despedradora de quinua.

3.3 Diseño de la investigación

El diseño es cuasi-experimental, ya que se implementará el sistema en un entorno real de producción sin la posibilidad de controlar todas las variables externas.

3.4 Ámbito de la Investigación

El ámbito es terrestre y tecnológico, centrado en la aplicación de tecnologías de monitoreo en maquinaria agrícola en el contexto de la producción de quinua en la región andina.

3.5 Población y muestra

Población: Máquinas despedradoras de quinua utilizadas en la región andina.

Muestra: Una máquina despedradora específica seleccionada para la implementación del sistema de monitoreo.

3. 6 Técnicas e instrumentos de recogida de información

Tabla 2

Técnicas e instrumentos de recogida de información

1. TÉCNICAS	2. INSTRUMENTO	3. VALIDACIÓN
Observación directa: Observación directa del funcionamiento de la máquina, medición de vibraciones utilizando sensores adecuados. análisis de datos mediante software especializado.	Ficha de Observación	Por asesor Especialista
Experimentos controlados: Se realizarán experimentos para evaluar el rendimiento del sistema en diferentes condiciones de control.	Sensores de vibración	

Nota: Elaboración propia

3. 7 Recogida de datos

La recogida de datos se realizó directamente en el entorno de operación de la máquina despedradora de quinua, con el objetivo de captar información precisa y representativa sobre el comportamiento vibratorio durante su funcionamiento normal. Para ello, se implementó un sistema de monitoreo que permitió registrar las vibraciones generadas en diferentes partes críticas de la máquina.

El proceso comenzó con la instalación de sensores de vibración en puntos estratégicos de la estructura, como el motor, la base y el sistema vibratorio principal. Estos sensores fueron seleccionados por su sensibilidad y capacidad de captar pequeños cambios en la aceleración, lo que facilitó una medición detallada de las vibraciones presentes.

Una vez instalados, los sensores se conectaron a un microcontrolador programado para registrar los datos de manera continua. Se configuró el sistema

para que capturara las señales de vibración a intervalos regulares mientras la máquina estaba en funcionamiento, durante diferentes momentos del día y con distintas cargas de trabajo. Esto permitió obtener una muestra variada de datos bajo diferentes condiciones operativas.

Los datos obtenidos fueron almacenados en una tarjeta de memoria y posteriormente transferidos a una computadora, donde fueron organizados y procesados utilizando software especializado. Durante este proceso se elaboraron gráficos de comportamiento y se analizaron los niveles de vibración, con el fin de identificar patrones, variaciones anómalas o posibles indicios de fallas mecánicas.

Este enfoque permitió contar con información técnica real y confiable sobre las vibraciones en la máquina despedradora, lo cual es fundamental para evaluar el estado del equipo y establecer recomendaciones para un mantenimiento más eficiente.

Tabla 3*Recogida de datos*

Variable	Instrumento	Frecuencia de recogida	Método
Sistema de monitoreo de vibraciones	Sensor de vibración, Controlador Lógico Programable (PLC)	Cada 100 milisegundos (0.1 s)	Registro automático
Comportamiento operativo de la máquina despedradora	registros de funcionamiento	En cada ciclo operativo de la máquina	Observación técnica, Registro automático

Nota: Elaboración propia

CAPITULO IV

ANALISIS DE RESULTADO Y DISCUSION

4. 1 Presentación

Figura 28

Maquina despedadora de quinua utilizada para las pruebas

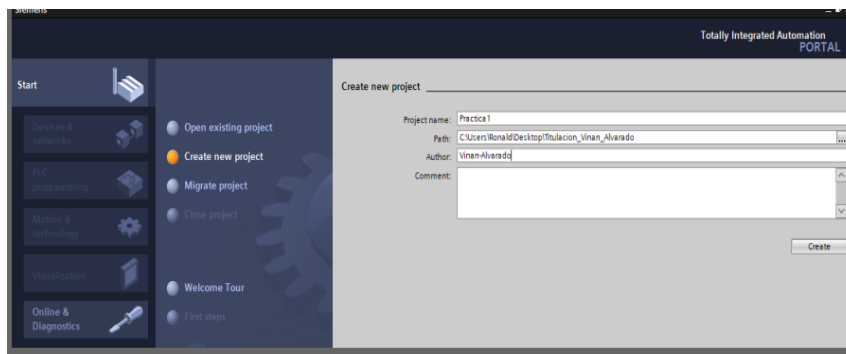


Nota: Elaboración propia

El primer paso es establecer un proyecto nuevo y ajustar nuestro PLC. S7-1200 en el programa Simatic TiaPortal. Esto incluye la instalación de la tarjeta de señal y la CPU y los módulos de entrada modbus.

Figura 29

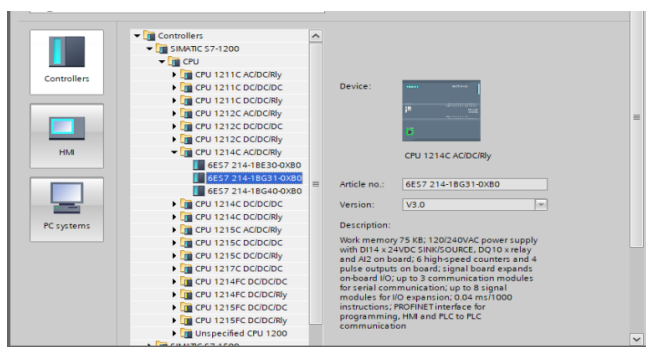
Iniciador del programa Simatic Tia Portal



Nota: Elaboración propia

Figura 30

Interfaz de elección de dispositivos

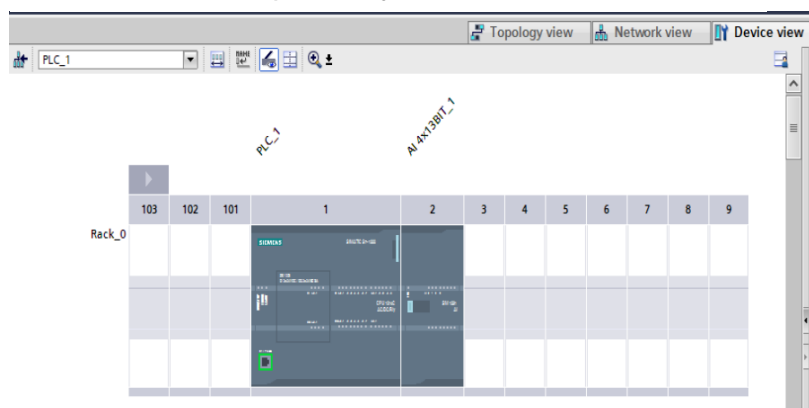


Nota: Elaboración propia

Incluir el módulo de entradas modbus.

Figura 31

Visualización del dispositivo y de los módulos añadidos.



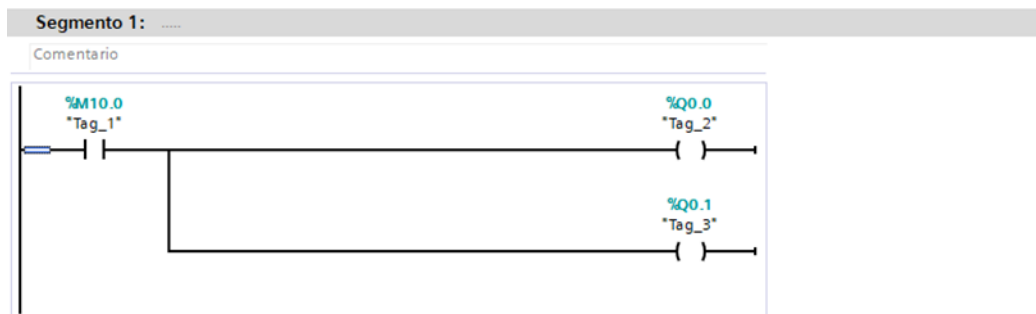
Nota: Elaboración propia

Monitoreo de variables de vibraciones

Segmento 1: Define variables de entrada y salida. Se observan etiquetas cómo %M10.0 y %Q0.0, que corresponden a estados de memoria y salidas digitales.

Figura 32

Definición de variables de entrada y salida



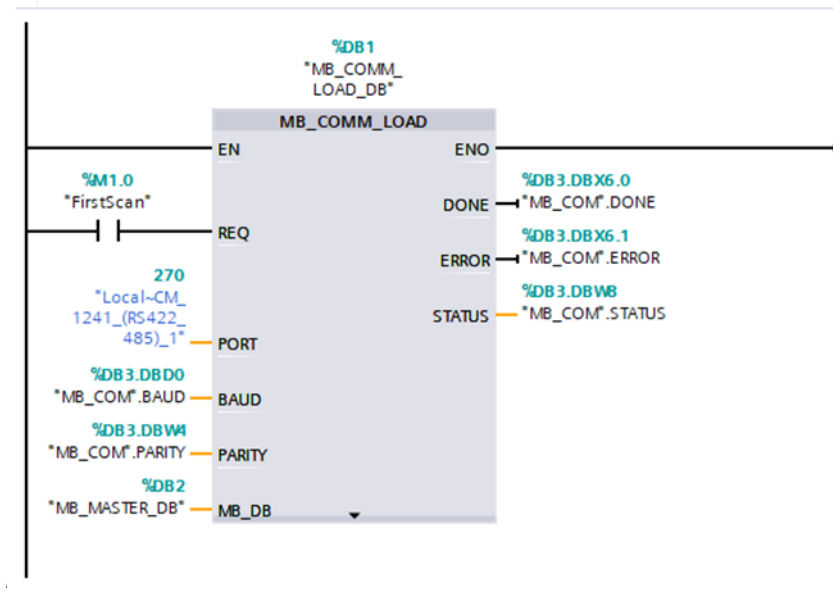
Nota: Elaboración propia

Segmentos 2 y 3 (MB_COMM_LOAD y MB_MASTER):

Se configuran parámetros de comunicación Modbus, como la velocidad de transmisión (BAUD), paridad (PARITY) y direcciones (MB_ADDR).

Figura 33

Configuración de parámetros de comunicación Modbus

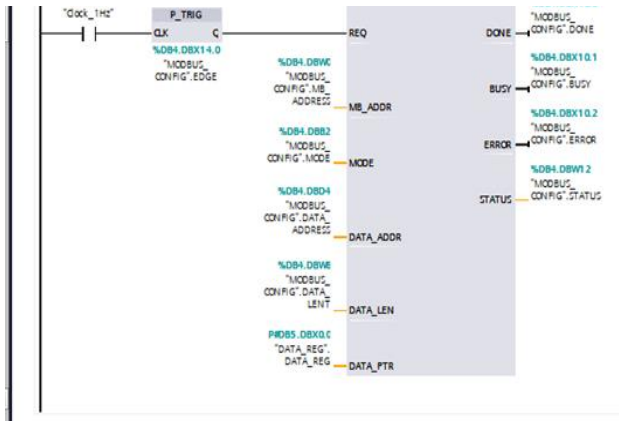


Nota: Elaboración propia

El segmento 3 incluye disparadores (P_TRIG) y estructuras para configurar la dirección de los datos (DATA_ADDRESS) y su longitud (DATA_LENT).

Figura 34

dirección de los datos



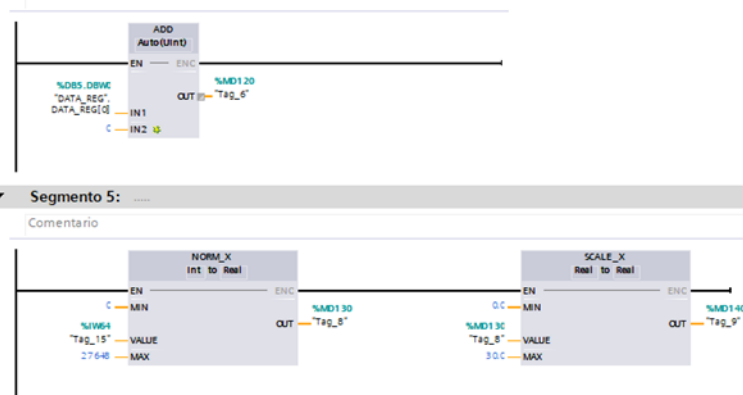
Nota: Elaboración propia

Segmentos 4 al 7 (Procesamiento de Datos):

Se realizan operaciones matemáticas con datos de sensores, escalando (SCALE_X y NORM_X) valores de entrada (%IW64) a un rango utilizable.

Figura 35

Realización de operaciones matemáticas

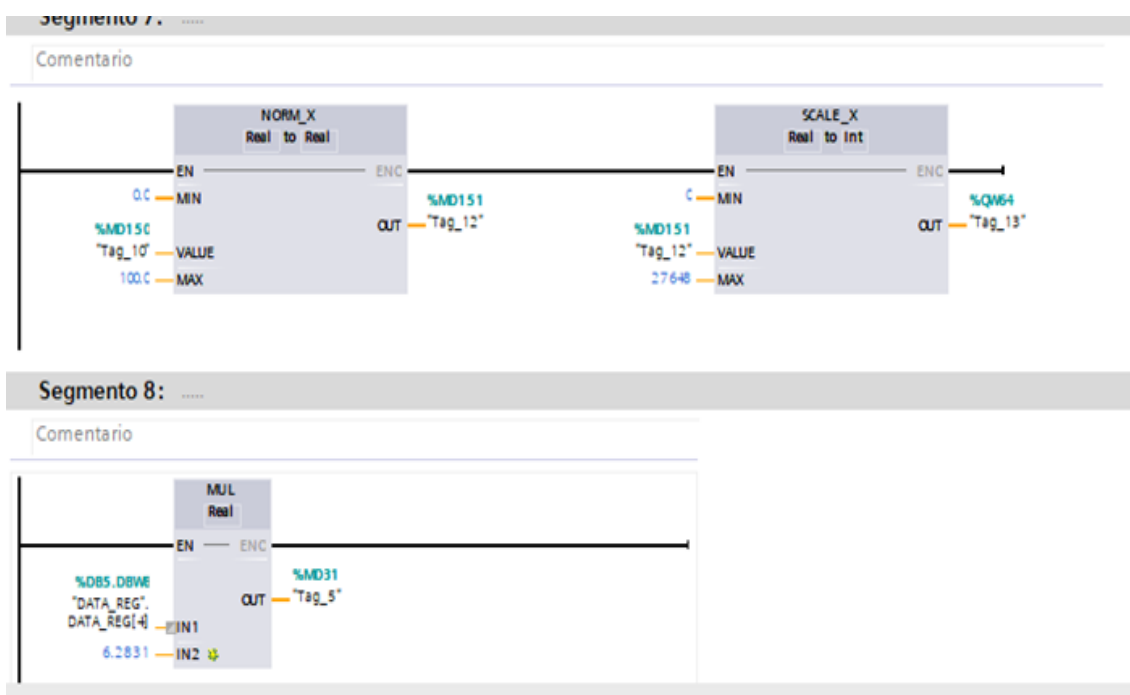


Nota: Elaboración propia

Se utilizan conversiones entre Real e Int.

Figura 36

Realización de conversiones



Nota: Elaboración propia

Segmentos 8 al 16 (Cálculos Matemáticos):

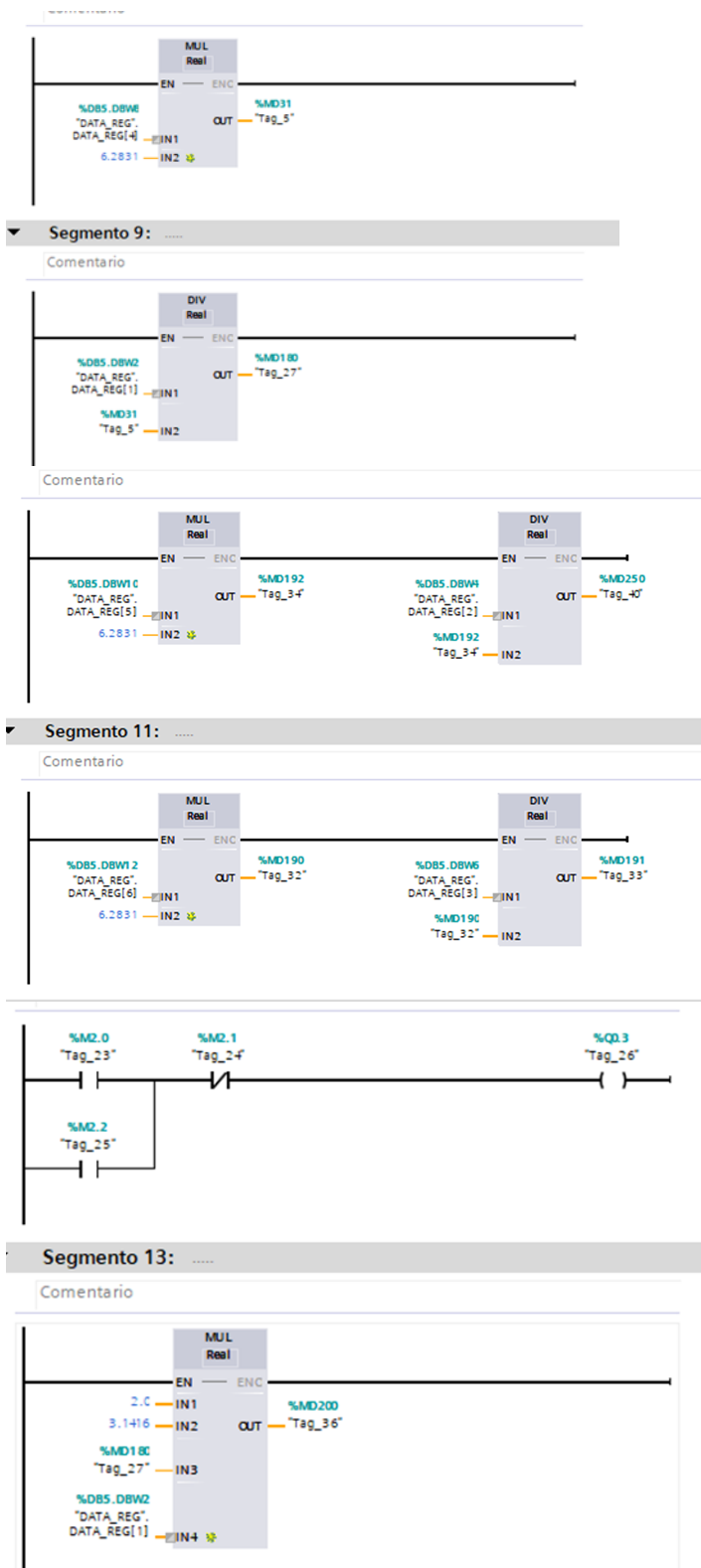
Se ejecutan operaciones como multiplicación (MUL), división (DIV), y normalización de valores.

Se utilizan valores constantes como 6.2831 (2π), lo que sugiere cálculos relacionados con oscilaciones o vibraciones.

Se observa el uso de registros de datos (DATA_REG) almacenados en %DB5.DBW.

Figura 37

Registros de datos



Nota: Elaboración propia



Análisis de los segmentos de multiplicación y división

1. Multiplicación (MUL) y uso de constantes

o En los segmentos donde se realiza la multiplicación, se usa la constante 6.2831, que es aproximadamente 2π .

o En análisis de vibraciones y oscilaciones, la frecuencia angular (ω) está relacionada con la frecuencia lineal (f) mediante la ecuación:

$$\omega = 2\pi f \quad \omega = 2\pi f$$

o frecuencia angular y frecuencia en Hz.

2. División (DIV) y normalización de datos

o período de oscilación (T), que se obtiene con:

$$T = \frac{1}{f} \quad T = \frac{1}{f}$$

o el sistema usa sensores de vibración, que van midiendo la aceleración y convirtiéndola en frecuencia a través de transformaciones matemáticas.

Fórmula Utilizada

Dado lo que hemos analizado, el cálculo de la frecuencia está basado en:

$$f = \frac{1}{2\pi} \times \text{señal normalizada} \times \text{constante de escala} \quad f = \frac{1}{2\pi} \times \text{señal normalizada} \times \text{constante de escala}$$

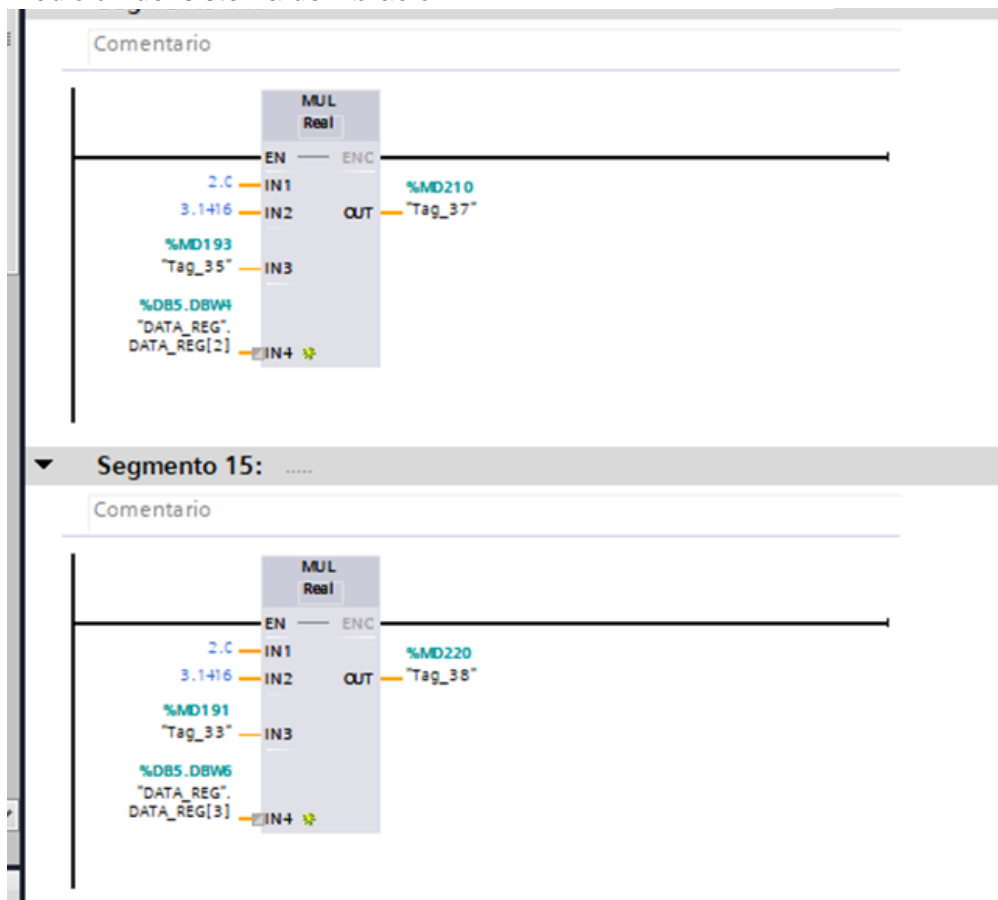
calculando la frecuencia desde un tiempo de oscilación detectado:

$$f = \frac{1}{T} \quad f = \frac{1}{T}$$

Donde T es el período obtenido de la señal del sensor.

Figura 38

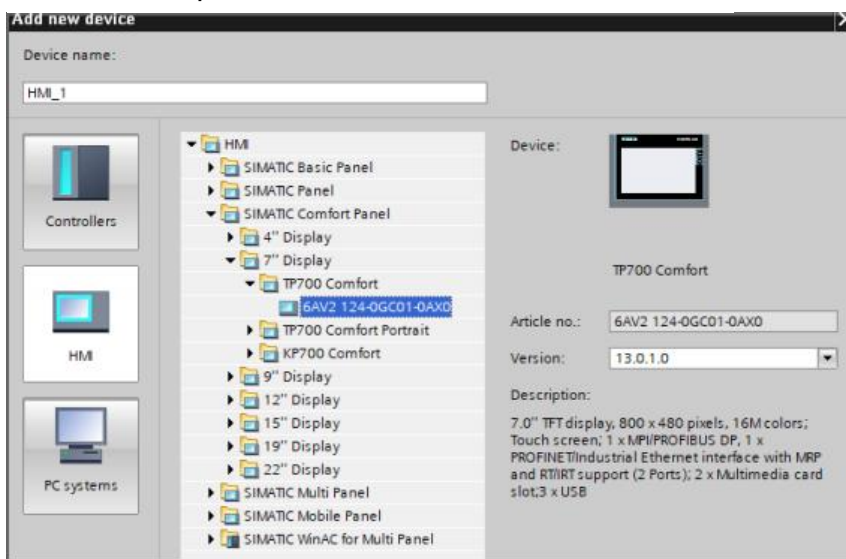
Medición del sistema de vibración



Nota: Elaboración propia

Figura 39

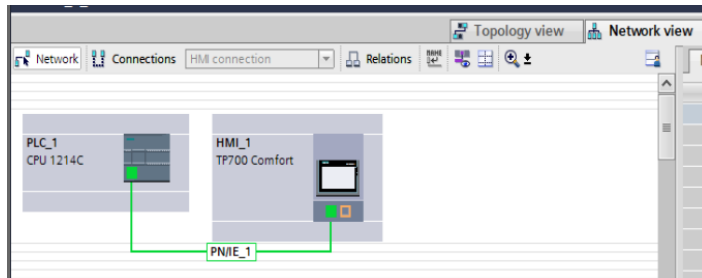
Elección de la pantalla HMI



Nota: Elaboración propia

Figura 40

comunicación PLC - HMI



Nota: Elaboración propia

4. 2 Pruebas y resultado

Una vez implementado el sistema de monitoreo de vibraciones, se procedió a realizar una serie de pruebas en la máquina despedradora de quinua, con el objetivo de evaluar su comportamiento operativo bajo diferentes condiciones y validar la funcionalidad del sistema instalado. Las pruebas se llevaron a cabo en el entorno real de trabajo de la máquina, durante jornadas de operación regulares, y consistieron en el registro continuo de vibraciones mediante el sensor de vibración colocados en puntos estratégicos de la estructura.

Figura 41

Tablero utilizado en el sistema de vibraciones



Nota: Elaboración propia

Figura 42

Medición de la vibración en la criba vibratoria



Nota: Elaboración propia

Figura 43

Medición de la vibración en la base de la criba vibratoria



Nota: Elaboración propia

Durante las pruebas, se realizaron tres tipos de evaluaciones: en vacío, en operación normal y bajo condiciones de carga controlada. La primera prueba se ejecutó sin carga de quinua se comprobó la lectura del sensor.

La segunda prueba se realizó con carga se incrementó la cantidad de quinua procesada, simulando una situación de esfuerzo. Como resultado, se observaron aumentos considerables en los valores de vibración, sobre todo en la base de la criba vibratoria. En esta fase, el sistema de monitoreo detectó picos elevados que podrían ser indicios de tensión estructural o desgaste prematuro si se mantuvieran en el tiempo. También se percibió un leve ruido adicional y una mayor inestabilidad, los cuales fueron anotados mediante observación directa.

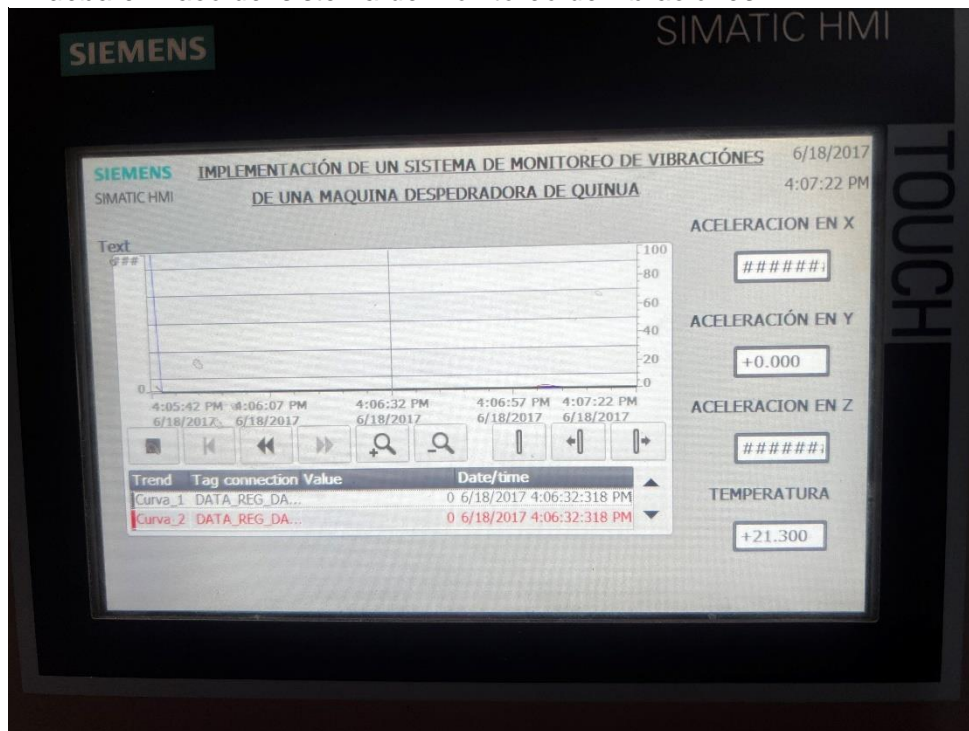
La tercera prueba se realizó con la máquina funcionando en condiciones normales, es decir, procesando una cantidad estándar de quinua. En este caso, se registraron aumentos moderados en los niveles de vibración, especialmente en la zona de la base estructural de la máquina despedadora de quinua, donde se concentra el movimiento mecánico del proceso de despedrado. Las vibraciones se mantuvieron dentro de un rango aceptable y se repitieron de forma cíclica, lo que refleja un comportamiento mecánico predecible.

En general, los resultados obtenidos demostraron que el sistema de monitoreo de vibraciones funciona correctamente y permite identificar variaciones significativas en el comportamiento operativo de la máquina. Además, proporcionó información útil para establecer límites de funcionamiento seguro y prevenir daños por exceso de carga o fallas mecánicas no detectadas visualmente.

4. 3 Análisis e interpretación de resultados

Figura 44

Prueba en vaco del sistema de monitoreo de vibraciones



Nota: Elaboración propia

Figura 45

Prueba en la criba vibratoria

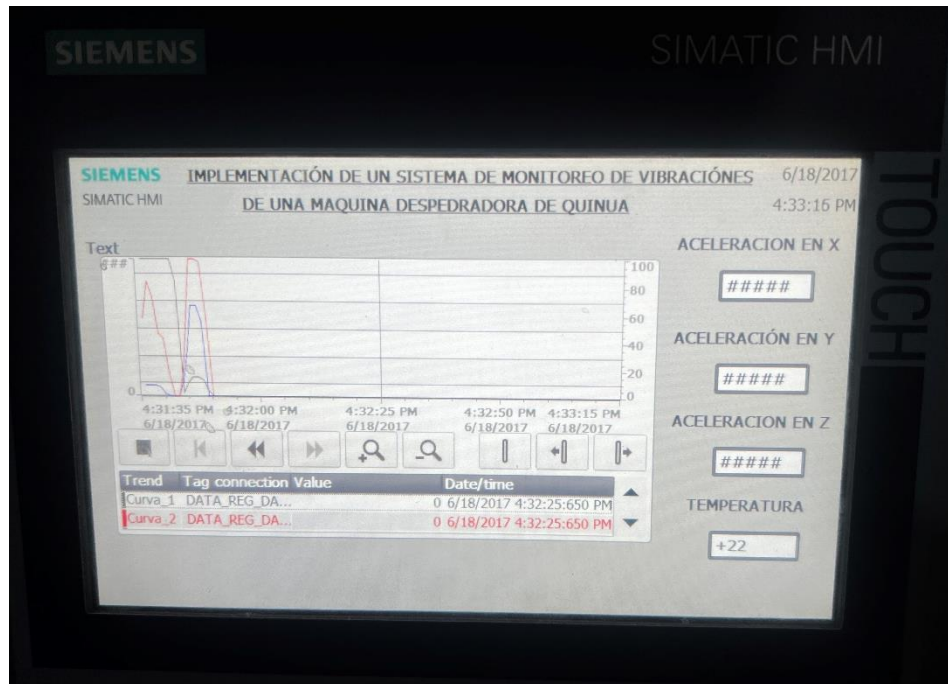
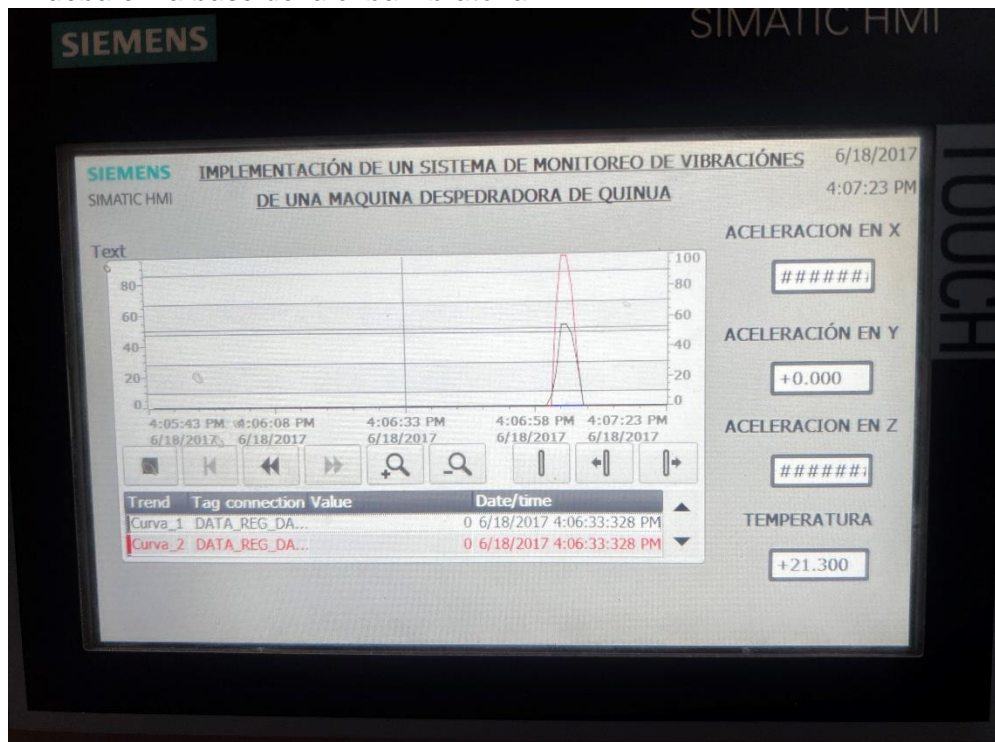


Figura 46

Prueba en la base de la criba vibratoria



Nota: Elaboración propia

El análisis de los datos obtenidos a partir del sistema de monitoreo de vibraciones permitió identificar comportamientos específicos en el funcionamiento



de la máquina despedradora bajo distintas condiciones operativas. Los valores registrados por el sensor fueron evaluados en función de su magnitud, frecuencia y patrón, lo cual permitió interpretar el estado mecánico del equipo.

Durante la prueba en vacío, los niveles de vibración se mantuvieron bajos y constantes, lo que indica que los componentes principales —como el motor, la base estructural y el mecanismo vibrador— no presentaban desequilibrios ni fallas evidentes. Esta etapa sirvió como línea base para comparar el comportamiento en condiciones más exigentes.

En la prueba con carga, los datos evidenciaron un aumento notable en las vibraciones, tanto en amplitud como en irregularidad. Se identificaron picos superiores a los registrados en condiciones normales, lo que sugiere un incremento en el esfuerzo mecánico de los componentes. Además, la frecuencia de vibración mostró pequeñas fluctuaciones, posiblemente asociadas a resonancias o desajustes inducidos por la carga excesiva. Estas señales podrían interpretarse como alertas tempranas de desgaste o potenciales fallas estructurales si la máquina opera en estas condiciones de manera continua.

En la tercera prueba de operación normal, se observaron incrementos en la intensidad de las vibraciones, principalmente en la zona de la base de la estructura de la máquina despedradora de quinua, que es donde se concentra el movimiento mecánico necesario para separar las piedras de la quinua. Las lecturas se mantuvieron dentro de un rango considerado funcionalmente aceptable, y su patrón fue cíclico y predecible. Este comportamiento es típico en máquinas vibratorias cuando operan dentro de su capacidad nominal y refleja una condición de trabajo estable.



El análisis también mostró que el sistema de monitoreo implementado tiene la capacidad de detectar con claridad estas variaciones, lo cual representa una ventaja significativa para la prevención de daños mayores. A través de la interpretación de las señales de vibración, es posible anticiparse a fallas, mejorar la programación del mantenimiento y prolongar la vida útil de la máquina.

4. 4 Discusión de resultados

Del antecedente de la tesis el "Diseño y la instrumentación de un banco de pruebas experimental que simula un sistema rotor-chumacera". Su principal aportación es proporcionar una herramienta didáctica y de investigación que permite reproducir y estudiar fenómenos vibracionales como desbalanceo, desalineación y fallos en chumaceras, bajo condiciones controladas. Esto facilita el aprendizaje práctico y la validación de tecnologías de medición y análisis vibracional, especialmente en un contexto académico y de formación técnica.

Por otro lado, la segunda tesis se orienta hacia la aplicación práctica en la industria, implementando un sistema de monitoreo de vibraciones en una máquina despedradora de quinua. Su objetivo es detectar fallas tempranas durante la operación real, lo que contribuye a mejorar la gestión del mantenimiento predictivo, reducir las paradas no programadas y extender la vida útil del equipo. Este enfoque responde directamente a necesidades operativas y productivas, aportando una solución tecnológica adaptada a un entorno industrial específico.

Mientras que el banco de pruebas permite un análisis profundo y controlado de los fenómenos vibracionales para la formación y experimentación, el sistema de monitoreo aplicado ofrece una herramienta práctica para la gestión eficiente del mantenimiento en la industria agroalimentaria. En conjunto, ambos trabajos refuerzan la importancia del análisis vibracional, desde su comprensión teórica



hasta su aplicación operativa, destacando la versatilidad y el impacto de estas técnicas en diferentes contextos.

Tabla de comparación

	Banco de pruebas rotor-chumacera	Sistema de monitoreo en máquina despedradora de quinua
Contexto de aplicación	Experimental y académico, para formación y validación de modelos teóricos.	Industrial y práctico, para mantenimiento predictivo y preventivo en maquinaria real.
Propósito principal	Reproducir fenómenos vibracionales y validar modelos de elementos finitos.	Detectar fallas tempranas mediante monitoreo continuo para evitar paradas no planificadas.
Resultados clave	Validación exitosa de frecuencias naturales y modos de vibración en condiciones controladas.	Detección temprana de anomalías vibracionales, mejora en planificación y reducción de fallas.
Tecnologías utilizadas	Sensores acelerométricos, tacómetro, software de análisis experimental.	Sensores de vibración, sistema de adquisición de datos, software de monitoreo en tiempo real.
Impacto operativo	Apoya la formación técnica y el análisis predictivo en un entorno controlado.	Mejora la confiabilidad y disponibilidad de la máquina en operación real.
Limitaciones	Aplicación restringida al laboratorio, sin uso directo en producción.	Focalizado en una máquina específica, con necesidad de adaptación para otros equipos.
Contribución general	Herramienta didáctica y experimental para comprensión y validación del análisis vibracional.	Solución tecnológica aplicada para mantenimiento eficiente en la industria agroindustrial.



CONCLUSIONES

Se logró implementar con éxito un sistema de monitoreo de vibraciones en una máquina despedradora de quinua, lo cual permitió detectar variaciones en el comportamiento dinámico del equipo en tiempo real. Este sistema contribuye significativamente a mejorar el mantenimiento predictivo, reducir paradas no programadas y aumentar la eficiencia operativa del proceso de postcosecha, validando así su viabilidad técnica y funcional dentro del contexto agroindustrial.

Se seleccionaron sensores de vibración adecuados al entorno industrial de la máquina despedradora, considerando su rango de medición, sensibilidad y compatibilidad con el sistema de adquisición de datos. Los sensores escogidos demostraron ser capaces de registrar con precisión las vibraciones en los ejes relevantes, lo que permitió obtener información confiable sobre el estado operativo de la máquina.

Se desarrolló una programación eficiente en el PLC para la adquisición y procesamiento de datos provenientes de los sensores de vibración. Esta programación permitió captar señales en tiempo real, almacenar valores relevantes y generar alertas cuando los niveles superaban los límites establecidos. El funcionamiento estable y continuo del sistema validó la correcta integración entre hardware y software

Se implementó una interfaz HMI intuitiva y funcional que permitió visualizar en tiempo real los niveles de vibración registrados por el sistema. Esta interfaz facilitó la interpretación rápida de datos por parte del operador, permitiendo una respuesta inmediata ante condiciones anómalas. El HMI demostró ser una herramienta clave para el control operativo y el mantenimiento predictivo..



RECOMENDACIONES

Se recomienda continuar con la mejora y adaptación del sistema para su uso en distintas condiciones de operación y en otros tipos de maquinaria agroindustrial. Esta implementación debe complementarse con estrategias de mantenimiento predictivo y con la formación del personal técnico en el análisis de datos de vibración. Además, se sugiere documentar los resultados operativos obtenidos tras su aplicación, con el fin de validar su impacto en la eficiencia, reducción de fallas y toma de decisiones sobre posibles mantenimientos.

Se recomienda, para futuras aplicaciones, realizar una evaluación comparativa entre diferentes tipos de sensores (piezoeléctricos, MEMS, IEPE) y seleccionar aquellos con mayor sensibilidad, menor error de lectura y adecuada protección contra el polvo y la humedad, considerando que el entorno agroindustrial puede ser agresivo para los componentes electrónicos.

Es aconsejable continuar optimizando la programación del PLC, incorporando funciones como el filtrado digital de señales, alarmas inteligentes, almacenamiento de tendencias y diagnóstico remoto. Esto permitirá una mayor automatización y precisión en la toma de decisiones de mantenimiento.

Se recomienda mejorar la interfaz HMI con gráficos más detallados, alertas visuales y sonoras, e inclusión de instrucciones operativas para facilitar el uso por parte del personal no especializado. También sería conveniente integrar el HMI a una red para monitoreo remoto desde otros dispositivos, como computadoras o smartphones.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Montoya, J., Mina, J., & Patiño, C. (2019). Desarrollo de un brazo robótico Scara clasificador de objetos. *Ingenierías*. Institución Universitaria Antonio José Camacho, Cali, Colombia.
<https://repositorio.uniajc.edu.co/handle/uniajc/732>
- Airtac. (20 de 09 de 2024). Brazo Neumático. Llma, Peru.
<https://www.airtacperu.com.pe/brazo-neumatico/>
- AirTAC International Group. (23 de 10 de 2023). *Airtac.com*. AirTAC International Group: <https://global.airtac.com/>
- Alba, E. (2019). "Modelado y sintonización de un controlador PID de un robot tipo puma de tres grados de libertad utilizando lógica difusa". *Ingenierías*. Universidad Nacional del Callao, Callao, Perú.
<http://hdl.handle.net/20.500.12952/3518>
- Álvarez, M. (2004). *Controladores Logicos*. Barcelona, España: Marcombo.
<https://books.google.hn/books?id=uR19LQiBpDgC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false>
- Álvarez, O., & Arango, J. (2013). Diseño e implementación de un sistema de control de temperatura en tanque esférico para el Hospital Pablo Tobón Uribe. *Pre grado*. Institución Universitaria Pascual Bravo, Medellín, Colombia. <https://repositorio.pascualbravo.edu.co/handle/pascualbravo/716>
- Alviz, E. (2022). Diseño e implementación de un módulo educativo para el control de temperatura, empleando controladores PI, PID y Predictor de SMITH. *Pre grado*. Universidad Católica de Santa María, Arequipa, Peru.
<https://repositorio.ucsm.edu.pe/handle/20.500.12920/11611>



- Asencio, R. (2018). Diseño de un sistema automatizado para procesos electroneumáticos de lógica cableada. *Pre grado*. Universidad Jose Carlos Mariategui. <https://hdl.handle.net/20.500.12819/405>
- Barbado, J., Sierra, J., & Bravo, J. (2013). *Automatismos Industriales*. México, México: Alfaomega Grupo Editor S.A. <https://biblioteca.epn.edu.ec/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=38545>
- Barcenas, J. (2020). Diseño de un sistema de sujeción para los elementos neumáticos fijos del laboratorio de neumática de la UAN. *Pre grado*. Universidad Antonio Nariño, Bogotá,, Colombia. <http://repositorio.uan.edu.co/handle/123456789/2223>
- Cabrera, S. (16 de 10 de 2023). *Scribd*. Guía de Módulo Neumática y Oleohidráulica: <https://es.scribd.com/document/187817702/Guia-de-Modulo-Neumatica-y-Oleohidraulica>
- Caicay, J. (2019). Propuesta de un sistema de automatización en la etapa de paletizado en una empresa de alimento balanceado para incrementar la productividad. *Pre grado*. Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo, Chiclayo, Peru. <http://hdl.handle.net/20.500.12423/1993>
- Cayancela, J., & Colcha, E. (2015). Diseño y construcción de un módulo de automatización del proceso de ensamblaje usando ventosa neumática, controlado con PLC y pantalla táctil para la Facultad de Mecánica de la ESPOCH. *Pre grado*. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Exuador. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/4485>
- Chavez, R. (2022). Análisis de desempeño en simulación de un controlador adaptativo en el control de trayectoria de un manipulador robotico de 2 grados de libertad. *Ingenierías* . Universidad Católica de Santa María,



Arequipa , Perú.

<https://repositorio.ucsm.edu.pe/handle/20.500.12920/12048>

Creus, A. (2007). *Neumática e Hidráulica*. Madrid, España: MARCOMBO, S.A.

<https://es.b-ok.lat/book/2553210/845965>

Daneri, P. (2008). *PLC. Automatización y control industrial*. Buenos Aires -, Argentina : Editorial Hispano Americana S.A. - H.A.S.A. <https://libros.ep-electropc.com/2018/06/plc-automatizacion-y-control-industrial.html?m=1>

Dueñez, J. (2020). Brazo robótico clasificador de colores RGB controlado con FPGA. *Ingenierías*. Instituto Tecnológico Superior de Guanajuato, Guanajuato, México . <https://rinacional.tecnm.mx/jspui/handle/TecNM/4303>

Elizalde, J. (2019). Diseño y análisis de dispositivo de sujeción reconfigurable para uso con robot industrial. *Maestria*. Centro de Ingenierías y Desarrollo industrial, Mexico.

<http://cidesi.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1024/450>

Fuertes, Y. (2017). Diseño e implementación de un módulo educativo para el control de temperatura. *Pre grado*. Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Peru. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/8629>

Galvez, C. (2023). Diseño de una herramienta electroneumática para la siembra automatizada de semillas de pequeñas dimensiones en bandejas de germinación. *Pre grado*. Universidad Cesar Vallejo, Trujillo, Peru.

<https://hdl.handle.net/20.500.12692/126438>

Gonzáles, T., del Río, G., Tena, J., & Torres, B. (2011). *Circuitos de fluidos. Suspensión y dirección*. Editex. https://www.uniliber.com/ficha/circuitos-de-fluidos-suspension-y-direccion-vvaa-tdk642_107767767/



Guadalupe, L. (2010). *Integración de celda didáctica de manufactura*. Guadalajara , México : FESTO PNEUMATICS.

<https://es.scribd.com/document/224114993/CeldaDidacticaFestoUVM>

Guayasamín, I., & López, N. (2007). Diseño y construcción de un tablero modular de formación profesional en la tecnología de automatización para el laboratorio de automatización industrial de procesos mecánicos de la Facultad de Mecánica de la EPN. *Ingenierías*. Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador . <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/2002>

Guillén, A. (1988). *Aplicaciones industriales de la neumática*. Barcelona, España: Marcombo S. A. <https://www.iplacex.cl/hubfs/pdf/mineduc/mecanica-industrial/maquinaria-industrial/aplicaciones-industriales-de-la-neumatica.pdf>

Guillén, A. (1993). *Introducción a la neumática*. Barcelona, España: Marcombo, S.A. https://kupdf.net/download/introduccion-a-la-neumatica-antonio-guillen-salvador_5d1ad6d8e2b6f585064583f1_pdf

Jaramillo, M. (2015). Diseño e implementación de un sistema de clasificación didáctico para supervisar un proceso industrial en el laboratorio de hidrónica y neutrónica. *Ingenierías*. Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE, Latacunga, Ecuador . <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/10049>

Jose, V. (10 de setiembre de 2009). *Sensores en un PLC al detalle*. Lima , Lima , Peru.

Luna, J. (2021). Sistema de seguridad adaptable para brazos robóticos. *Ingenierías*. Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/21120>



- Mateo, M. (2022). Clasificación de piezas metálicas mediante una Red Neuronal Convolutiva y Análisis de Componentes Principales. *Ingenierías*. Universidad Autónoma del estado de México, México , México.
<http://hdl.handle.net/20.500.11799/137394>
- Piedrafita, R. (2004). *Ingeniería de la Automatización Industrial* (Segunda ed.). México : Alfaomega. <https://es.scribd.com/document/596377245/pdfcoffee-com-375800189-ingenieria-de-la-automatizacion-industrial-2-ed-pedro-piedrafitapdf-5-pdf-free>
- Portugal, S., & Vargas, E. (2020). Diseño e implementación de un módulo educativo de control neumático secuencial. *Pre gradp*. Universidad Católica de Santa María, Peru.
<https://repositorio.ucsm.edu.pe/handle/20.500.12920/9783>
- Ramírez, J., & Palacios, C. (2016). Diseño de un efector final de ventosa por vacío. *Maestra*. Instituto Politécnico Nacional, México.
<http://tesis.ipn.mx/handle/123456789/16156>
- Rodríguez, F., & Berenguel, M. (2004). *Control y Robótica en agricultura*. Almeria , España: El Ejido.
<https://books.google.com.ec/books?id=ccckBQAAQBAJ&printsec=copyright#v=onepage&q&f=false>
- Sanchez, K., & Goche, M. (2021). Implementación de un módulo con sistema de periferia descentralizada Hart, para el control de nivel y temperatura en la planta de tanques del Laboratorio de Control de la Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica. *Pre grado*. Universidad Privada de Tacna, Tacna, Peru. <http://hdl.handle.net/20.500.12969/2104>



- Serrano, A. (2009). *Neumática Práctica*. Madrid, España: Paraninfo, S.A.
https://books.google.com.pe/books/about/Neum%C3%A1tica_pr%C3%A1ctica.html?id=-IUVsZSC6GsC&redir_esc=y
- ShneiderElectric. (25 de 10 de 2023). *Se.com*. Interfaz Hombre Maquina:
<https://www.se.com/cr/es/product-category/2100-hmi-interfaz-hombre-m%C3%A1quina/>
- Somolinos, J. (2002). *Avances en robótica y visión por computador*. España: Univ. de Castilla La Mancha,.
https://books.google.com.pe/books/about/Avances_en_rob%C3%B3tica_y_visi%C3%B3n_por_compu.html?id=V-eXwzEIngQC&redir_esc=y
- Suarez, E., & Torres, P. (2017). Diseño e Implementación de un Sistema Scada para el Control PID de Nivel y Temperatura Independientes en Dos Tanques de la Planta de Procesos Análogos (PPA). *Pre grado*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia.
<http://hdl.handle.net/11349/7847>
- Viñan, C., & Alvarado, R. (2018). Diseño e implementación de un sistema de control de temperatura y nivel de agua en la planta de llenado de tanques del laboratorio de automatización industrial utilizando un algoritmo PID. *Pre grado*. Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador.
<https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/16060>



ANEXOS



Anexo 1. Matriz de consistencia

TÍTULO: IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA DE CONTROL PARA EL MONITOREO DE LA TEMPERATURA DE CALENTAMIENTO EN UN MODULO DE TANQUE DE ALIMENTACIÓN CONTINUA					
AUTOR: DENIS PAUL GOMEZ MIRANDA					
PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPOSTESIS	VARIABLES E INDICADORES		
<p>PROBLEMA GENERAL</p> <p>Como Implementar un sistema de control para el monitoreo de la temperatura de calentamiento en un módulo de tanque de alimentación continua.</p> <p>PROBLEMAS ESPECÍFICOS</p> <p>¿De qué manera se realiza la selección de sensores y actuadores para el módulo tanque de alimentación continua?</p> <p>¿Como se desarrolla la programación del PLC para el control de la temperatura de calentamiento en el módulo de tanque de alimentación continua?</p> <p>¿De qué manera se realiza el monitoreo de la temperatura de calentamiento en el módulo de tanque de alimentación continua?</p>	<p>OBJETIVOS GENERAL</p> <p>Implementar un sistema de control para el monitoreo de la temperatura de calentamiento en un módulo de tanque de alimentación continua.</p> <p>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</p> <p>OE1. Seleccionar los sensores y actuadores para el módulo tanque de alimentación continua.</p> <p>OE2. Desarrollar la programación del PLC para el control de la temperatura de calentamiento en el módulo de tanque de alimentación continua.</p> <p>OE3. Realizar el monitoreo de la temperatura de calentamiento en el módulo de tanque de alimentación continua.</p>	<p>HIPOSTESIS GENERAL</p> <p>La implementación de un sistema de control para el monitoreo de la temperatura en el módulo de tanque de alimentación continua permitirá mantener la temperatura dentro de los rangos óptimos de operación, mejorando así la eficiencia del proceso y reduciendo el riesgo de sobrecalentamiento.</p> <p>HIPÓTESIS ESPECIFICAS</p> <p>La selección adecuada de sensores y actuadores para el módulo de tanque de alimentación continua permitirá un control más eficiente del proceso, garantizando mediciones precisas y respuestas rápidas a las variaciones en las condiciones del sistema.</p> <p>El desarrollo de una programación adecuada en el PLC para el control de la temperatura en el módulo de tanque de alimentación continua mejorará la precisión en la regulación de la temperatura deseada.</p> <p>El monitoreo continuo de la temperatura de calentamiento en el módulo de tanque de alimentación continua permitirá detectar y corregir desviaciones en tiempo real, mejorando la estabilidad del proceso y evitando fallos en el sistema.</p>	Variable Independiente	Dimensiones	Indicador
			Variable Independiente: Sistema de control	Procesamiento de señales	Tiempo de respuesta
			Variable dependiente: Temperatura de calentamiento del tanque.	Medición de temperatura	Temperatura del tanque

Anexo: 2 HMI HTP 700 Siemens

SIEMENS

Data sheet

6AV2123-2GA03-0AX0

SIMATIC HMI, KTP700 BASIC DP, BASIC PANEL, KEY AND TOUCH OPERATION, 7" TFT DISPLAY, 65536 COLORS, PROFIBUS INTERFACE, CONFIGURATION FROM WINCC BASIC V13/ STEP7 BASIC V13, CONTAINS OPEN SOURCE SW WHICH IS PROVIDED FREE OF CHARGE FOR DETAILS SEE CD



Product type designation	
Display	
Design of display	TFT widescreen display, LED backlighting
Screen diagonal	7 in
Display width	154.1 mm
Display height	85.9 mm
Number of colors	65 536
Resolution (pixels)	
• Horizontal image resolution	800
• Vertical image resolution	480
Backlighting	
• MTBF backlighting (at 25 °C)	20 000 h
• Dimmable backlight	Yes
Control elements	
Keyboard	
• Function keys	
— Number of function keys	8
• Keys with LED	No
• System keys	No
• Numeric/alphabetical input	
— Numeric keyboard	Yes; Onscreen keyboard
— Alphanumeric keyboard	Yes; Onscreen keyboard
Touch operation	
• Design as touch screen	Yes

Anexo: 3 PLC S7 1200 Siemens

SIEMENS

Hoja de datos

6ES7215-1BG40-0XB0



SIMATIC S7-1200, CPU 1215C, CPU compacta, AC/DC/relé, 2 puertos PROFINET, E/S integradas: 14 DI 24 V DC; 10 DO, relé 2 A, 2 AI 0-10 V DC, 2 AO 0-20 mA DC, alimentación: AC 85-264 V AC con 47-63 Hz, memoria de programas/datos 200 kB

Información general	
Designación del tipo de producto	CPU 1215C AC/DC/Relais
Versión de firmware	V4.6
Ingeniería con	<ul style="list-style-type: none"> Paquete de programación
	STEP 7 V18 o superior
Tensión de alimentación	
Valor nominal (AC)	
<ul style="list-style-type: none"> 120 V AC 230 V AC 	<ul style="list-style-type: none"> Si Si
Rango admisible, límite inferior (AC)	85 V
Rango admisible, límite superior (AC)	265 V
Frecuencia de red	
<ul style="list-style-type: none"> Rango admisible, límite inferior Rango admisible, límite superior 	<ul style="list-style-type: none"> 47 Hz 63 Hz
Intensidad de entrada	
Consumo (valor nominal)	100 mA con 120 V AC; 50 mA con 240 V AC
Consumo, máx.	300 mA con 120 V AC; 150 mA con 240 V AC
Intensidad de cierre, máx.	20 A; con 264 V
It	0,8 A ² s
Intensidad de salida	
Para bus de fondo (5 V DC), máx.	1 600 mA; máx. 5 V DC para SM y CM
Alimentación de sensores	
Alimentación de sensores 24 V	
<ul style="list-style-type: none"> 24 V 	20,4 a 28,8 V
Pérdidas	
Pérdidas, típ.	14 W
Memoria	
Memoria de trabajo	
<ul style="list-style-type: none"> integrada 	200 kbyte
Memoria de carga	
<ul style="list-style-type: none"> integrada enchufable (SIMATIC Memory Card), máx. 	<ul style="list-style-type: none"> 4 Mbyte con SIMATIC Memory Card
Respaldo	
<ul style="list-style-type: none"> existente libre de mantenimiento sin pila 	<ul style="list-style-type: none"> Si Si Si
Tiempos de ejecución de la CPU	
para operaciones de bits, típ.	0,08 µs; /instrucción
para operaciones a palabras, típ.	1,7 µs; /instrucción
para aritmética de coma flotante, típ.	2,3 µs; /instrucción

6ES72151BG400XB0
Página 1/6

11/4/2024

Sujeto a cambios
© Copyright Siemens

Anexo: 4 MODULO ANALOGICO Siemens

SIEMENS

Hoja de datos

6ES7232-4HB32-0XB0



SIMATIC S7-1200, Salida analógica, SM 1232, 2 AO, +/-10V, Resolución de 14 bits, o 0-20 mA/4-20 mA, Resolución de 13 bits

Figura similar

Información general	
Designación del tipo de producto	SM 1232, AQ 2x14 bit
Tensión de alimentación	
Valor nominal (DC)	24 V
Intensidad de entrada	
Consumo, tip.	45 mA
de bus de fondo 5 V DC, tip.	80 mA
Pérdidas	
Pérdidas, tip.	1,5 W
Salidas analógicas	
Nº de salidas analógicas	2; Tipo corriente o tensión
Rangos de salida, tensión	
• -10 V a +10 V	Si
Rangos de salida, intensidad	
• 0 a 20 mA	Si
Resistencia de carga (en rango nominal de la salida)	
• con salidas de tensión, mín.	1 000 Ω
• con salidas de intensidad, máx.	600 Ω
Longitud del cable	
• apantallado, máx.	100 m; apantallado, par trenzado
Formación de valor analógico para salidas	
Tiempo de integración y conversión/resolución por canal	
• Resolución con rango de rebase (bits incl. signo), máx.	14 bit; Tensión: 14 bits, Corriente: 13 bits
Error/precisiones	
Error de temperatura (referido al rango de salida, (+/-))	25 °C ±0,3 %, a 55 °C ±0,6 % todo el rango de medida
Límite de error básico (límite de error práctico a 25 °C)	
• Tensión, referida al rango de salida, (+/-)	0,3 %
• Intensidad, referida al rango de salida, (+/-)	0,3 %
Supresión de tensiones perturbadoras para (f1 +/- 1%), f1 = frecuencia perturbadora	
• Tensión en modo común, máx.	12 V
Alarmas/diagnósticos/información de estado	
Alarmas	Si
Función de diagnóstico	Si
Alarmas	
• Alarma de diagnóstico	Si
Diagnósticos	
• Vigilancia de la tensión de alimentación	Si
• Rotura de hilo	Si
• Cortocircuito	Si



ANEXO 1
FORMULARIO DE AUTORIZACIÓN

AUTORIZACIÓN PARA LA INCORPORACIÓN DE LOS
TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN
EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL UANCV

Formato digital

Fecha de entrega: 21/08/2025

1. Datos del autor (es):

Nombres y Apellidos: JIMMY ALEXANDER MAMANI CHARCA

Dirección: Av. La torre 719 DNI/Carné de Extranjería/Pasaporte N°: 73958840

Teléfono: 938730654 email: alexandercharca10@gmail.com

Nombres y Apellidos: _____

Dirección: _____

DNI/Carné de Extranjería/Pasaporte N°: _____

Teléfono: _____ email: _____

Facultad y/o Escuela de Posgrado: INGENIERÍAS Y CIENCIAS PURAS

Escuela Profesional o Mención: INGENIERÍA MECATRÓNICA

Título o Grado Académico a optar: INGENIERO MECATRÓNICO

Asesor: Dr. RICARDO ANIBAL MALDONADO MAMANI

Esta obra se encuentra dentro de las siguientes denominaciones:

Trabajo de Investigación Tesis Trabajo de Suficiencia Profesional Trabajo Académico

Título: IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MONITOREO DE VIBRACIONES EN UNA MAQUINA DESPEDRADORA DE QUINUA

Palabras claves, (3 a 5 términos): Sistema de monitoreo, vibraciones, maquina despedradora de quinua

¿Esta obra se desarrolló en la UANCV ^{1, 2}?

1

¹ Indicar si su producción intelectual ha empleado recursos tales como, instalaciones, laboratorios, insumos, equipos, bases de datos, asesoría técnica por parte del personal de la UANCV, financiamiento, entre otros relacionados.

² Si su producción intelectual se desarrolló en la UANCV totalmente o parcialmente, deberá autorizar el depósito en el Repositorio de manera obligatoria.



2. Referencia de tesis:

Bachiller Título 2da Especialidad Maestría Doctorado

3. Licencias:

a) Licencia estándar:

Bajo los siguientes términos, autorizo el depósito de mi tesis en el Repositorio Digital de la UANCV.

Con la autorización de depósito de mi producción Intelectual, otorgo a la Universidad Andina “Néstor Cáceres Velásquez” una licencia no exclusiva para reproducir, distribuir, comunicar al público, transformar (únicamente mediante su traducción a otros idiomas) y poner a disposición del público mi producción intelectual (incluido el resumen), en formato físico o digital, en cualquier medio, conocido o por conocerse, a través de los diversos servicios por la Universidad, creados o por crearse, tales como el Repositorio Digital de tesis UANCV, colección de producción intelectual, entre otros, en el Perú y en el extranjero por el tiempo y veces que considere necesarias, y libres de remuneraciones.

En virtud de dicha licencia, la Universidad Andina “Néstor Cáceres Velásquez” podrá reproducir mi producción intelectual en cualquier tipo de soporte y en más de un ejemplar, sin modificar su contenido, solo con propósitos de seguridad, respaldo y preservación.

Declaro que la producción intelectual es una creación de mi autoría y exclusiva titularidad, coautoría con titularidad compartida, y me encuentro facultado a conceder la presente licencia y, asimismo, garantizo que dicha producción intelectual no infringe derechos de autor de terceras personas.

La Universidad Andina “Néstor Cáceres Velásquez” consignará el nombre del y/o los autor (es) de la producción intelectual, y no le hará ninguna modificación más que la permitida en la licencia.

Autorizo su publicación (marque con una X)

- Sí, autorizo que se deposite inmediatamente.
- Sí, autorizo que se deposite a partir de la fecha (d/m/a): _____
- No autorizo.

b) Licencia CREATIVE COMMONS 4.0 INTERNACIONAL:

Si usted concede una licencia CREATIVE COMMONS sobre su producción intelectual, mantiene la titularidad de los derechos de autor de esta y, a la vez, permite que otras personas puedan reproducirla, comunicarla al público y distribuir ejemplares de esta, bajo las condiciones siguientes:

¿Quiere permitir usos comerciales de su producción intelectual?

Sí: significa que usted permite la reproducción, distribución y comunicación pública de la producción intelectual incluso con fines comerciales.

No: significa que usted permite la reproducción, y comunicación pública de la producción intelectual, pero sin fines comerciales.

- Sí autorizo
- No autorizo

Jurisdicción de su Licencia

Todas las licencias CREATIVE COMMONS son de ámbito mundial, sin embargo, usted puede elegir entre la opción “internacional” o una adaptada a su jurisdicción, como para el caso peruano.

La opción “internacional” emplea el lenguaje y la terminología de los tratados internacionales; en cambio, la adaptada a su jurisdicción, recoge las particularidades de la legislación peruana.

En consecuencia, **la opción “internacional” goza de una mayor eficacia a nivel mundial, gracias a que tiene jurisdicción neutral.** Mientras que la opción adaptada a la jurisdicción del Perú goza de una mayor eficacia ante los tribunales peruanos.

Internacional

Nacional

Línea de investigación: **Tecnología de la Instrumentación – P21**

Firma de Autor



huella digital

21 de agosto del 2025

Fecha