

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**  
**SEDE CUENCA**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

*Trabajo de titulación  
previo a la obtención del  
Título de Ingenierc  
Mecánicc*

**PROYECTO TÉCNICO:**

**“PROPUESTA DE INTEGRACIÓN DEL ANÁLISIS DE  
VIBRACIONES AL PLAN DE MANTENIMIENTO, PREDICTIVO DE  
LOS RODILLOS DE LAS PRENSAS 1 Y 2 EN EL MOLINO DE  
CARTOPEL S.A.I.”**

**AUTORA:**

ANA KARLA CALLE LAZO

**TUTOR:**

Dr. RENÉ VINICIO SÁNCHEZ LOJA

CUENCA - ECUADOR

2020

## CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Ana Karla Calle Lazo con documento de identificación N° 0105187975, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales, en virtud de que soy autora del trabajo de titulación: **“PROPUESTA DE INTEGRACIÓN DEL ANÁLISIS DE VIBRACIONES AL PLAN DE MANTENIMIENTO, PREDICTIVO DE LOS RODILLOS DE LAS PRENSAS 1 Y 2 EN EL MOLINO DE CARTOPEL S.A.I.”**, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: *Ingeniería Mecánica* en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autora me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, mayo del 2020



Ana Karla Calle Lazo

C.I. 0105187975

## CERTIFICACIÓN

Yo, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **PROPUESTA DE INTEGRACIÓN DEL ANÁLISIS DE VIBRACIONES AL PLAN DE MANTENIMIENTO, PREDICTIVO DE LOS RODILLOS DE LAS PRENSAS 1 Y 2 EN EL MOLINO DE CARTOPEL S.A.I.**”, realizado por Ana Karla Calle Lazo, obteniendo el *Proyecto Técnico* que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, mayo del 2020



.....  
Dr. René Vinicio Sánchez Loja

C.I. 0103409587

## DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Yo, Ana Karla Calle Lazo con documento de identificación N° 0105187975, autora del trabajo de titulación: **“PROPUESTA DE INTEGRACIÓN DEL ANÁLISIS DE VIBRACIONES AL PLAN DE MANTENIMIENTO, PREDICTIVO DE LOS RODILLOS DE LAS PRENSAS 1 Y 2 EN EL MOLINO DE CARTOPEL S.A.I.”**, certifico que el total contenido del *Proyecto Técnico* es de mi exclusiva responsabilidad y autoría.

Cuenca, mayo del 2020



Ana Karla Calle Lazo

C.I. 0105187975

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a Dios, porque siempre abre las puertas que toco y responde a mis preguntas guiándome por donde debo ir. A la Universidad, que, aunque no tuve hermanos me permitió encontrarlos en ella, siempre quedarán en mis memorias cada momento bueno y malo, que pasamos en las aulas, patios y alrededores aprendiendo de la ingeniería y de la vida cada día. Agradezco a mis profesores, a todos y cada uno de ellos que me guiaron y supieron tener la paciencia para entender mi terquedad y diferencia.

Agradezco a mi familia, de manera especial a mi querida tía Elsa que siempre me apoyó de una u otra forma. A mi madre, por sus consejos y rabieta, por su amor, soporte y paciencia.

Agradezco por su puesto al Grupo de Investigación GIDTEC, a su director, Ing. Vinicio Sánchez quien aportó en mí los conocimientos y la metodología de investigación y más que nada me participó la oportunidad de crecer y aprender de la mano con su grupo de trabajo, agradezco a cada uno de los que forman parte de este: Dra. Mariela Cerrada, Dr. Diego Cabrera, Calo, Pablo, Julio, Mauricio, a Franco y Christian por su amistad, paciencia, consejos y apoyo.

Agradezco también, al grupo de trabajo del Departamento Técnico de Mantenimiento de CARTOPEL, especialmente al Ingeniero Fernando Heredia por abrirme las puertas del conocimiento práctico de la ingeniería, guiándome con su experiencia a lo largo de este proyecto.

## DEDICATORIA

Para ti. Marcia, mi valiente madre;  
porque el rendirte jamás fue una opción.

*A los Invisibles.*

Ana Karla Calle.

## RESUMEN

El presente proyecto técnico con título: “Propuesta de integración del análisis de vibraciones al plan de mantenimiento predictivo de los rodillos de las prensas 1 y 2 en el molino de Cartopel S.A.I.”, situado dentro del contexto del mantenimiento basado en la condición, en el cual se realizó una propuesta que permita integrar el análisis de vibraciones al plan de mantenimiento predictivo de los rodillos de las prensas 1 y 2 en el molino de Cartopel S.A.I. tiene como finalidad brindar un aporte al departamento de mantenimiento de esta empresa, mediante el análisis de señales de vibración para el monitoreo de condición en el área de prensado.

El capítulo 1, presenta la introducción al proyecto técnico, se aborda su problemática, antecedentes y se plantean los objetivos hacia los cuales va dirigido. Justificando de esta forma la importancia de la integración del análisis de vibraciones al plan de mantenimiento de las prensas 1 y 2 brindando un aporte al sistema de mantenimiento predictivo del molino de la empresa.

El capítulo 2, establece la base del marco teórico bajo el cual se lleva a cabo el proyecto, presenta temas como el mantenimiento, tipos de mantenimiento y sus principales técnicas. De manera específica se habla a cerca del Análisis de vibraciones, sus características y todo lo que en cuanto al tema de vibraciones concierne. También se hace una recapitulación del análisis de criticidad que va de la mano con el del mantenimiento industrial. Por último, se aborda el tema de las máquinas papeleras; una breve síntesis de su funcionamiento y características principales.

En el capítulo 3, se determinan las partes fundamentales del plan de mantenimiento que Cartopel emplea en el molino, enfocándonos al área de las prensas. Se presenta primeramente una introducción hacia la planta, sus áreas, los tipos de mantenimiento implementados en las prensas del molino de papel, junto con su medio de gestión de la información; así como el personal involucrado y sus funciones. De igual manera, se expone una caracterización de las prensas donde se describe sus partes, características técnicas, funcionamiento, e históricos exponiendo las principales fallas de las prensas 1 y 2 durante un período de tiempo especificado.

El capítulo 4, se presenta un análisis de criticidad como previa justificación para la realización de cualquier técnica predictiva, en el caso del presente proyecto el análisis de vibraciones. Por tanto, se manifiesta en valores medibles la criticidad del área de prensas y sus componentes.

El capítulo 5, es una sección donde se realiza la evaluación de la Vibración de las prensas 1 y 2, basado en la norma 10816 – 3 mediante los valores obtenidos por las empresas contratadas por Cartopel para dicho servicio. Para lo cual inicialmente se clasifican las prensas dentro de un rango de maquinaria industrial según la norma 10816, se traza la ruta de vibración de ambas prensas, se identifican las frecuencias características de vibración de estas y finalmente concluye con el análisis de tendencia de vibración.

El capítulo 6, exhibe la propuesta de la implementación del análisis de vibraciones mediante la determinación de los parámetros que se necesitan para su integración al plan de mantenimiento predictivo; por consiguiente, se establecen en este apartado seis etapas para llevar a cabo su ejecución.

Por último, se presentan las conclusiones y recomendaciones acorde a los objetivos planteados y una propuesta para posibles trabajos futuros.



## **ABSTRACT**

This technical project entitled: "Proposal for the integration of vibration analysis to the predictive maintenance plan for the rollers of presses 1 and 2 in the Cartopel SAI mill", located within the context of condition-based maintenance, in the which a proposal was made that allows integrating the vibration analysis to the predictive maintenance plan of the rollers of presses 1 and 2 in the Cartopel SAI mill. Its purpose is to provide a contribution to the company's maintenance department, through the vibration signals analysis for condition monitoring at pressing area.

Chapter 1 presents the introduction to the technical project, addresses its issues, background, and the objectives towards which it is directed. Thus, justifying the importance of integrating vibration analysis into the maintenance plan for presses 1 and 2, providing a contribution to the company's predictive mill maintenance system.

Chapter 2, establishes the basis of the theoretical framework under which the project is carried out, presents topics such as maintenance, types of maintenance and their main techniques. Specifically, we talk about Vibration Analysis, its characteristics and everything related to vibrations, concierge. A summary of the critical analysis that goes hand in hand with industrial maintenance is also made. Finally, the topic of paper machines is addressed, a brief synthesis of its operation and main characteristics.

In chapter 3, the fundamental parts of the maintenance plan that Cartopel uses in the mill are determined, focusing on the presses area. Firstly, an introduction to the plant, its areas, the types of maintenance implemented in the paper mill presses, together with its information management means; as well as the personnel involved and their functions. Likewise, a characterization of the presses is exposed, describing their parts, technical characteristics, operation, and history, exposing the main faults of presses 1 and 2 during a specified period.

Chapter 4 presents a critical analysis as a previous justification for the realization of any predictive technique, in the case of this project, the analysis of vibrations. Therefore, criticism of the press area and its components is manifested in measurable values.

Chapter 5 is a section where the evaluation of Vibration of presses 1 and 2 is carried out, based on standard 10816 - 3 using the values affected by the companies hired by Cartopel for said service. For what they qualify, the presses are classified within a range of industrial machinery according to standard 10816, the vibration path of the embassies is traced, the

characteristic frequencies of vibration of these are identified and finally concludes with the vibration trend analysis.

Chapter 6, shows the proposal of the implementation of the analysis of vibrations by determining the parameters that are needed for its integration into the predictive maintenance plan; therefore, six stages are established in this section to carry out its execution.

Finally, the conclusions and recommendations are presented according to the objectives set and a proposal for possible future work.

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR .....</b>	<b>I</b>
<b>CERTIFICACIÓN .....</b>	<b>II</b>
<b>DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD .....</b>	<b>III</b>
<b>AGRADECIMIENTOS.....</b>	<b>IV</b>
<b>DEDICATORIA.....</b>	<b>V</b>
<b>RESUMEN .....</b>	<b>VI</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>VIII</b>
<b>ÍNDICE DE CONTENIDOS .....</b>	<b>X</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>XIV</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS.....</b>	<b>XVII</b>
1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 Problema .....	1
1.1.1 Antecedentes.....	1
1.1.2 Importancia y alcance .....	6
1.1.3 Delimitación.....	7
1.2 Objetivos .....	7
1.2.1 Objetivo General.....	7
1.2.2 Objetivo Específico .....	8
2. MARCO TEÓRICO.....	9
2.1 Mantenimiento .....	9
2.1.1 Mantenimiento Predictivo.....	10
2.2.2 Técnicas de mantenimiento predictivo.....	11
2.2 Vibraciones .....	15
2.2.1 Definición de vibración .....	15
2.2.2 Características de la vibración.....	16
2.3 Vibraciones en maquinaria rotativa.....	18
2.3.1 Maquinaria rotativa .....	18
2.3.2 Funcionamiento .....	18

2.4	Análisis de Vibraciones .....	19
2.5	Normativa para análisis de vibraciones .....	19
2.5.1	Rango de frecuencia.....	20
2.5.2	Medición de la vibración .....	20
2.5.3	Magnitudes y unidades de medición.....	21
2.5.4	Severidad de la vibración.....	21
2.5.5	Posiciones de medición .....	22
2.5.6	Posiciones para mediciones en ejes rotativos.....	23
2.5.7	Pruebas <i>In-situ</i> .....	24
2.5.8	Instrumentación.....	24
2.5.9	Vibración absoluta del eje .....	25
2.6	Análisis de criticidad .....	25
2.7	Máquina Papelera .....	26
3.	CARACTERIZACIÓN DEL PLAN DE MANTENIMIENTO.....	28
3.1	Metas y objetivos del plan de mantenimiento predictivo.....	28
3.1.1	Misión y visión del departamento de mantenimiento .....	28
3.1.2	Objetivos del mantenimiento de las prensas Gorostidi 1 y 2.....	28
3.2	Descripción de la empresa .....	29
3.2.1	Descripción de misión y visión de la empresa .....	29
3.2.2	Estructura organizacional de la Empresa .....	30
3.2.3	Principales áreas de la empresa.....	30
3.2.4	Molino papelerero.....	31
3.2.5	Descripción general de las áreas de la planta del molino.....	32
3.3	Área de prensado.....	35
3.3.1	Codificación de equipos .....	35
3.4	Caracterización de las prensas Gorostidi 1 y 2.....	35
3.4.1	Ubicación.....	35
3.4.2	Partes principales.....	37
3.4.3	Características técnicas .....	39
3.4.4	Funcionamiento de las prensas Gorostidi 1 y 2.....	40
3.4.5	Función de las prensas Gorostidi 1 y 2.....	42
3.5	Historial de mantenimiento .....	43
3.5.1	Almacenamiento de archivos.....	43
3.5.2	Fallas detectadas .....	45

3.6	Mantenimiento realizado en la sección de prensas.....	50
3.6.1	Tipos de mantenimiento realizado para prensas Gorostidi 1 y 2.....	50
3.6.2	Técnicas de mantenimiento aplicadas en las prensas 1 y 2 .....	50
3.7	Planeación de mantenimiento.....	51
3.8	Software de mantenimiento .....	51
3.9	Situación actual del monitoreo de vibraciones.....	52
3.9.1	Contratación de servicios .....	53
3.9.2	Informes de análisis de vibraciones .....	53
3.10	Gestión de repuestos .....	53
3.10.1	Manejo de inventario .....	53
3.10.2	Manejo y organización de bodega.....	53
3.10.3	Proveedores.....	54
3.10.4	Recursos humanos .....	54
3.10.5	Compras.....	54
3.11	Gestión de recursos humanos .....	55
3.11.1	Estructura organizacional del departamento de mantenimiento.....	55
3.11.2	Definición de Roles dentro del Dpto. de Mantenimiento.....	55
4.	ANÁLISIS DE CRITICIDAD.....	58
4.1	Introducción.....	58
4.2	Alcance del análisis de criticidad .....	58
4.3	Metodología del Análisis de criticidad.....	59
4.3.1	Definición de niveles .....	59
4.3.2	Establecimiento de criterios.....	60
4.4	Estimación de severidad.....	62
4.4.1	Cálculo de la Criticidad.....	65
4.4.2	Jerarquización.....	67
5.	ANÁLISIS DE VIBRACIONES.....	69
5.1	Clasificación de maquinaria según norma ISO 10816 .....	69
5.1.1	Clasificación por grupos ISO 10816-3.....	69
5.2	Ruta de vibración.....	69
5.2.1	Rodillos de prensa Gorostidi 1.....	71
5.2.2	Rodillos de prensa Gorostidi 2.....	72
5.3	Frecuencias características.....	74
5.3.1	Identificación de frecuencias características .....	79

5.4	Análisis de tendencia de la vibración.....	80
5.4.1	Tendencia de la vibración .....	80
5.4.2	Lecturas de la prensa Gorostidi 1 .....	81
5.4.3	Lectura de la prensa Gorostidi 2.....	90
5.4.4	Lecturas rodillo superior .....	97
6.	PROPUESTA DE IMPLEMENTACIÓN DEL ANÁLISIS DE VIBRACIONES MANTENIMIENTO PREDICTIVO.....	99
6.1	Etapa 1: Análisis costo beneficio .....	102
6.2	Etapa 2: Auditoria del equipo.....	103
6.2.1	Identificación del equipo.....	103
6.2.2	Identificación de la función del equipo.....	104
6.3	Etapa 3: Análisis de criticidad .....	105
6.4	Etapa 4: Método de monitoreo .....	106
6.4.1	Técnica de medición .....	106
6.4.2	Condiciones de operación.....	107
6.4.3	Intervalo de monitoreo.....	107
6.4.4	Tasa de adquisición .....	108
6.4.5	Puntos de medición.....	109
6.4.6	Establecer criterios de alarma.....	109
6.4.7	Establecer línea base .....	110
6.5	Etapa 5: Adquisición de datos .....	110
6.5.1	Adquisición.....	110
6.5.2	Comparar con criterio de alarma.....	112
6.5.3	Diagnóstico del equipo.....	113
6.6	Etapa 6: Determinar acción de mantenimiento .....	114
6.7	Etapa 7: Revisión.....	115
7.	CONCLUSIONES.....	116
8.	RECOMENDACIONES.....	117
9.	TRABAJOS FUTUROS .....	117
10.	BIBLIOGRAFÍA.....	118

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Proceso Productivo de CARTOPEL S.A.I.....	2
<b>Figura 2.</b> Rodillos de prensa Gorostidi 1 [5]. .....	7
<b>Figura 3.</b> Taxonomía del Mantenimiento [6].....	9
<b>Figura 4.</b> Representación de la vibración: forma de onda senoidal.....	15
<b>Figura 5.</b> Espectro frecuencial de una onda senoidal.....	17
<b>Figura 6.</b> Gráfica de la velocidad de un objeto que vibra. ....	17
<b>Figura 7.</b> Gráfica de la aceleración de un objeto que vibra. ....	18
<b>Figura 8.</b> Principio de funcionamiento de maquinaria rotativa (Motores).....	18
<b>Figura 9.</b> Puntos de medición para rodamientos de pedestal [37].....	22
<b>Figura 10.</b> Puntos de medida para maquinas eléctricas pequeñas [37].....	22
<b>Figura 11.</b> Puntos de medición para medidas en ejes rotativos [37].....	23
<b>Figura 12.</b> Esquema máquina papelera [41]. ....	27
<b>Figura 13.</b> Organigrama de la empresa CARTOPEL S.A.I.....	30
<b>Figura 14.</b> División de áreas productivas de la CARTOPEL S.A.I.....	31
<b>Figura 15.</b> Ejemplo de codificación prensa Gorostidi superior 1.....	35
<b>Figura 16.</b> Ubicación de las prensas Gorostidi 1 y 2. ....	36
<b>Figura 17.</b> Prensas Gorostidi 1 y 2. ....	37
<b>Figura 18.</b> Partes de la Prensa Gorostidi 2.....	38
<b>Figura 19.</b> Partes principales de la Prensa Gorostidi. ....	39
<b>Figura 20.</b> Pistón hidráulico, prensa Gorostidi 1. ....	41
<b>Figura 21.</b> Centralita de la prensa Gorostidi 2. ....	41

<b>Figura 22.</b> Sistema SCADA de prensas.....	42
<b>Figura 23.</b> Biblioteca de Históricos.....	43
<b>Figura 24.</b> Administración del sistema Api-Pro.....	52
<b>Figura 25.</b> Estructura Organizacional del Dpto. de Mantenimiento.....	55
<b>Figura 26.</b> Prensas seleccionadas para el análisis de criticidad.....	58
<b>Figura 27.</b> Metodología para el análisis de criticidad en las prensas.....	59
<b>Figura 28.</b> Niveles de análisis para evaluar la criticidad.....	60
<b>Figura 29.</b> Diagrama de Pareto de niveles de criticidad del área de prensado.....	68
<b>Figura 30.</b> Diagrama de Ruta de vibración.....	70
<b>Figura 31.</b> Puntos y posiciones de medición del rodillo de prensa superior 1.....	71
<b>Figura 32.</b> Puntos y posiciones de medición del rodillo de prensa inferior 1.....	72
<b>Figura 33.</b> Puntos y posiciones de medición del rodillo de prensa superior 2.....	72
<b>Figura 34.</b> Puntos y posiciones de medición del rodillo de prensa inferior 2.....	73
<b>Figura 35.</b> Espectro de velocidad de vibración del rodillo de prensa superior #1, medido del lado de transmisión en posición vertical.....	79
<b>Figura 36.</b> Espectro de velocidad de vibración del rodillo de prensa superior 2, medido del lado de transmisión en posición horizontal.....	80
<b>Figura 37.</b> Apoyo rígido del rodillo inferior de la prensa Gorostidi 1.....	82
<b>Figura 38.</b> Tendencia de vibración: Rodillo Inferior LSV.....	82
<b>Figura 39.</b> Tendencia de vibración: rodillo inferior - lado transmisión - dirección horizontal.....	83
<b>Figura 40.</b> Apoyo flexible del rodillo superior.....	85
<b>Figura 41.</b> Tendencia de vibración: rodillo superior - lado servicio - dirección vertical.....	86



<b>Figura 42.</b> Tendencia de vibración: rodillo superior - lado servicio - dirección horizontal.	87
<b>Figura 43.</b> Tendencia de vibración: rodillo superior - lado transmisión - dirección vertical. .....	88
<b>Figura 44.</b> Tendencia de vibración: rodillo superior - lado transmisión - dirección horizontal. .....	89
<b>Figura 45.</b> Apoyo rígido del rodillo inferior.....	91
<b>Figura 46.</b> Tendencia de vibración: rodillo inferior - lado servicio - dirección vertical. ....	91
<b>Figura 47.</b> Tendencia de vibración: Lado servicio - dirección horizontal.....	92
<b>Figura 48.</b> Tendencia de vibración: Lado servicio - dirección horizontal.....	94
<b>Figura 49.</b> Tendencia de vibración: rodillo inferior - lado transmisión - dirección vertical.	95
<b>Figura 50.</b> Tendencia de vibración: rodillo inferior - lado transmisión - dirección horizontal. .....	96
<b>Figura 51.</b> Apoyo flexible del rodillo superior de la prensa Gorostidi 2. ....	97
<b>Figura 52.</b> Tendencia de vibración: rodillo superior - lado servicio - dirección vertical. ....	98
<b>Figura 53.</b> Tendencia de vibración: rodillo superior - lado transmisión - dirección vertical. .....	99
<b>Figura 54.</b> Flujograma del proceso de mantenimiento [43].....	101
<b>Figura 55.</b> Resultado de la combinación de estrategias de mantenimiento [44].....	102
<b>Figura 56.</b> Factores del sistema que influyen en los rodillos inferiores. ....	103
<b>Figura 57.</b> Factores del sistema que influyen en los rodillos superiores.....	104
<b>Figura 58.</b> Ejemplo de la ruta de vibración.....	111

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Reseña histórica de la empresa CARTOPEL [2]. .....	3
<b>Tabla 2.</b> Técnicas de Mantenimiento Predictivo.....	13
<b>Tabla 3.</b> Definición de desplazamiento según la norma 20816. ....	21
<b>Tabla 4.</b> Objetivos de Mantenimiento de las prensas Gorostidi 1 y 2.....	29
<b>Tabla 5.</b> Áreas del Molino.....	32
<b>Tabla 6.</b> Datos técnicos de las Prensas Gorostidi 1 y 2. ....	39
<b>Tabla 7.</b> Contenido de los Archivos de mantenimiento, Prensa Inferior Gorostidi 1. ....	43
<b>Tabla 8.</b> Fallas detectadas en las prensas Gorostidi 1 y 2. ....	45
<b>Tabla 9.</b> Técnicas predictivas aplicadas en el área de prensado. ....	50
<b>Tabla 10.</b> Redundancia de subsistemas del área de las prensas. ....	61
<b>Tabla 11.</b> Estimación cuantitativa de valores para la ocurrencia de fallos. ....	63
<b>Tabla 12.</b> Estimación cuantitativa de valores para la severidad.....	63
<b>Tabla 13.</b> Asignación de valores para estimación de severidad en área de las Prensas.....	64
<b>Tabla 14.</b> Asignación de valores de ocurrencia de fallos en área de prensado.....	65
<b>Tabla 15.</b> Valores de criticidad del área de prensado.....	67
<b>Tabla 16.</b> Clasificación de las prensas según Norma 10816.....	69
<b>Tabla 17.</b> Frecuencias características del rodillo prensa Gorostidi superior 1 .....	74
<b>Tabla 18.</b> Frecuencias características del rodillo prensa Gorostidi inferior 1.....	75
<b>Tabla 19.</b> Frecuencias características del rodillo prensa Gorostidi superior 2. ....	76
<b>Tabla 20.</b> Frecuencias características del rodillo prensa Gorostidi inferior 2. ....	77

<b>Tabla 21.</b> Frecuencias principales del rodillo de prensa superior 1, medido del lado de transmisión en posición vertical.....	79
<b>Tabla 22.</b> Frecuencias principales del rodillo de prensa superior 1, medido del lado de transmisión en posición horizontal. ....	80
<b>Tabla 23.</b> Lecturas de vibración: rodillo inferior - lado servicio - dirección vertical. ....	83
<b>Tabla 24.</b> Lecturas de vibración: rodillo inferior - lado transmisión - dirección horizontal.	84
<b>Tabla 25.</b> Lecturas de vibración: rodillo superior - lado servicio - dirección vertical.....	86
<b>Tabla 26.</b> Lecturas de vibración: rodillo superior - lado servicio - dirección horizontal.....	87
<b>Tabla 27.</b> Lecturas de vibración: rodillo superior - lado transmisión - dirección vertical....	88
<b>Tabla 28.</b> Lecturas de vibración: rodillo superior - lado transmisión - dirección horizontal. ....	89
<b>Tabla 29.</b> Lecturas de vibración: rodillo inferior - lado servicio - dirección vertical. ....	92
<b>Tabla 30.</b> Lecturas de vibración: rodillo inferior - lado servicio - dirección horizontal.....	93
<b>Tabla 31.</b> Lecturas de vibración: rodillo inferior - lado servicio - dirección horizontal. ....	94
<b>Tabla 32.</b> Lecturas de vibración: rodillo inferior - lado transmisión - dirección vertical. ....	95
<b>Tabla 33.</b> Lecturas de vibración: rodillo inferior - lado transmisión - dirección horizontal.	96
<b>Tabla 34.</b> Lecturas de vibración: rodillo superior - lado servicio - dirección vertical.....	98
<b>Tabla 35.</b> Lecturas de vibración: rodillo superior - lado transmisión - dirección vertical...	99
<b>Tabla 36.</b> Descripción de la función de los rodillos de las prensas Gorostidi 1 y 2. ....	104
<b>Tabla 37.</b> Lista de criticidad de los elementos de las prensas Gorostidi 1 y 2. ....	105
<b>Tabla 38.</b> Condiciones de operación de los rodillos de las prensas Gorostidi 1 y 2.....	107
<b>Tabla 39.</b> Alarma de los rodillos de las prensas Gorostidi 1 y 2, de acuerdo con los valores de RMS de la velocidad de vibración. ....	109

<b>Tabla 40.</b> Interpretación de los niveles de alarma.....	110
<b>Tabla 41.</b> Formato de adquisición propuesto. ....	112

# 1. INTRODUCCIÓN

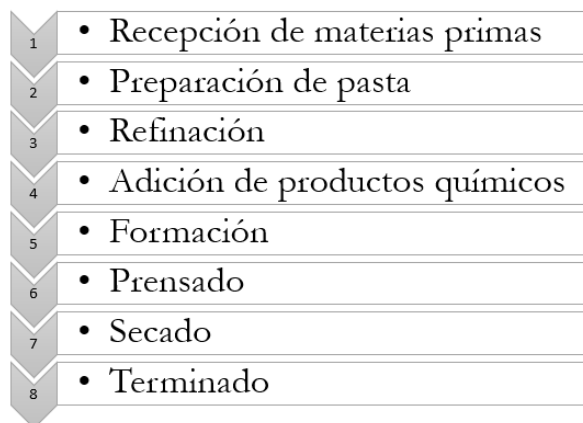
La importancia del mantenimiento industrial radica en la necesidad que tienen las empresas de conservar todas sus máquinas e instalaciones trabajando continua y eficientemente. Existen maneras de realizar mantenimiento, la primera es el mantenimiento correctivo dedicado a la reparación de los equipos en el momento en que fallan; otra de las maneras, es el mantenimiento preventivo encargado de detectar daños en los equipos antes de que éstos dejen de funcionar y detengan el proceso de producción. Las grandes industrias, conscientes de las pérdidas que se producen cuando una máquina se descompone e interrumpe su producción, destinan una buena parte de su presupuesto en actividades de mantenimiento preventivo. El mantenimiento preventivo posee una herramienta muy importante: El mantenimiento predictivo. Este mantenimiento realiza un seguimiento de cada una de las variables relacionadas con el funcionamiento de las máquinas para poder predecir posibles fallas y tomar las acciones correctivas más apropiadas en el momento oportuno.

## 1.1 PROBLEMA

### 1.1.1 Antecedentes

El mantenimiento predictivo ha venido ganando terreno durante los últimos años en la industria ecuatoriana, por lo que la UPS sede Cuenca cuenta con un laboratorio de análisis de vibraciones donde el Grupo de Investigación y Desarrollo en Tecnologías Industriales (GIDTEC) trabaja en investigaciones sobre mantenimiento basado en la condición de máquinas rotativas que apoya a la industria 4.0.

La empresa papelera CARTOPEL, fundada en el año 1989 con el objetivo de fabricar y comercializar cartones, cartulinas, papeles y derivados, ha venido integrando en el mercado sus productos mediante un proceso productivo que consta de las siguientes etapa (Figura 1) [1]:



**Figura 1.** Proceso Productivo de CARTOPEL S.A.I.

Recepción de materia prima. Se almacena en la zona de patios de materia prima que es el lugar de consumo diario de fibras.

Preparación de pasta. En esta fase, se alimenta el pulper, que consiste en un tanque, el mismo que tiene en el fondo un rotor. El objetivo principal del proceso de desintegración que ocurre en el pulper consiste en reducir el material seco a forma de pasta, agregando la cantidad suficiente de agua para adaptarlo al proceso. El proceso de pulpeo se logra un grado aceptable de disgregación de fibras, de este modo la fibra de celulosa se pone en suspensión y puede ser convenientemente transportada por bombeo hacia las etapas siguientes.

Refinación. Esta fase se caracteriza por el tratamiento mecánico que se aplica a la fibra de celulosa, haciéndola pasar una suspensión de esta a través de un espacio relativamente angosto entre un plato o cono giratorio y un estacionario, ambos provistos de barras o cuchillas.

Adición de productos químicos. Esta fase se realiza con la finalidad de impartirle características especiales o incrementar las propiedades resistencia del producto terminado se adicionan productos químicos funcionales o de control para obtener papeles de alto rendimiento.

Formación. Fase en la que el papel se hace depositando las fibras de una suspensión acuosa de consistencia muy baja sobre una tela relativamente fina. La máquina de papel es una máquina mixta de formación ya que posee, dos sistemas de formación: dos mesas planas Fourdrinier, una para la capa Back y otra para la capa Top. El head box, en ambas mesas de formación son de tipo presurizado, con rodillos defloculadores y sistemas de control de perfil del papel.

Prensado. Esta fase consiste en reducir el contenido de humedad de la hoja mediante presión y compactar las fibras de celulosa para incrementar la resistencia del papel mediante presión. La máquina de papel dispone de un sistema de toma de hoja pick up y su respectivo rodillo de presión y dos prensas adicionales que nos permiten secar la hoja.

Secado. Esta fase tiene como objetivo aceptar una hoja relativamente seca procedente de la sección de prensas, con contenido de humedad del 57%, y eliminar agua hasta alcanzar la humedad deseada del 6 al 8%. Para lograr este propósito se utilizan cilindros secadores calentados con vapor de agua, dispuestos en cinco secciones.

Terminado. En esta fase, luego de salir la hoja de la sección de secadores el papel pasa por el pope reel, una vez enrollado el papel se procede al rebobinado y corte de acuerdo con las necesidades del cliente

Para realizar este proceso productivo se han llevado a cabo varios trabajos de implementación de maquinaria y mejora de las instalaciones desde el año 1990, donde se hizo una modificación de su ingeniería y se concluyó el montaje del molino 1. Hasta la actualidad se ha aumentado la capacidad instalada del molino a más de 100.000 Tm/año, mejorando la respuesta ante las exigencias del mercado y consiguiendo ser pioneros de mantenimiento en el parque industrial de la ciudad de Cuenca. En la Tabla 1, se observa una reseña histórica de la empresa.

**Tabla 1.** Reseña histórica de la empresa CARTOPEL [2].

<b>Año</b>	<b>Actividad realizada</b>
<b>1988</b>	Se funda CARTOPEL S.A.I. con el objetivo de fabricar y comercializar cartones, cartulinas y papeles, además de sus derivados.
<b>1990</b>	Luego de la adquisición de instalaciones y maquinaria, se concluye el montaje del primer molino, tras la modificación de su ingeniería, para utilizar la máquina en la producción de papeles <i>kraft liner</i> y corrugado medio.
<b>1991</b>	Se da paso al arranque del primer molino papelerero con una capacidad inicial de 10.800 Tm/año.

Año	Actividad realizada
	Se constituye a Ondutec S.A.I. como subsidiaria de CARTOPEL, con el objetivo de la fabricación y comercialización de empaques en cartón corrugado, con una capacidad instalada equivalente a 54.000 Tm/año.
1993	Puesta en marcha la máquina número 2, destinada a la fabricación de cartones de alta densidad, con una capacidad instalada de 5.400 Tm/año.
1994	Se incrementa la capacidad instalada del molino a 25.000 Tm/año. Inicia la operación de la central termoeléctrica con objetivo de autogenerar la energía requerida en épocas de estiaje, con una potencia generada de 2.200 kW/h.
	La capacidad instalada del primer molino aumentó a 30.000 Tm/año.
1997	Buscando mejorar la flexibilidad, se adquiere Corrupac S.A. una segunda planta corrugadora especializada en atender requerimientos del mercado bananero.
1998	Se coloca CARTOPEL como la primera empresa del Austro y también en la primera cartonera del país en certificar con la norma internacional ISO 9001.
2001	CARTOPEL S.A.I. absorbe Ondutec S.A.I. y Corrupac S.A.
2003	Se realiza un <i>up grade</i> tecnológico en las plantas corrugadoras.
2006	Se destina importante cantidad de recursos para renovar equipos y capacitación de operadores con fin de reducir sustancialmente los índices de desperdicio y aumentar la productividad en la sección de corrugado.
2007	Se da a lugar al Proyecto 220Tm/día en el molino papelero, y se alcanza una capacidad instalada de 65.000Tm/año.
	Se invierte en la automatización del <i>head box</i> en el primer molino papelero y en una nueva ampliación de la capacidad instalada.
2008	En las plantas corrugadoras se continua el plan de modernización de maquinaria y equipos para consolidar una mayor velocidad de repuesta a las exigencias de los clientes.



Año	Actividad realizada
2010	Se incrementa la capacidad instalada del molino papelerero, esta vez a 100.000 Tm/año. Se suscribe un acuerdo de cooperación y alianza comercial con Eursa S.A., planta corrugadora ubicada en Machala.
2011	Se invierte en nuevas y modernas imprentas para dotar de alta tecnología al acabado de empaques de cartón corrugado; así también se moderniza la línea de corrugado con la adquisición de una moderna maquinaria.
2012	Se amplía la capacidad de secado en el molino; se instala Kroffta en el sistema de efluentes que permitirá una mejor recuperación de agua para proceso y limpieza de efluentes.
2013	Se optimiza el sistema de efluentes: adicional al Kroffta se han instalado un tromel, un Gama <i>Filter</i> la cual permite una mejor recuperación de agua para proceso y limpieza de efluentes también se realizó la implementación de un sistema de monitoreo remoto.
2014	Se lleva a cabo la ampliación de la subestación eléctrica en 2000 KVA.
2016	Se amplía la velocidad de la máquina del molino, buscando alcanzar producciones altas con papeles de bajo gramaje (127 gr). En la planta corrugadora Cuenca se completa el montaje de la imprenta Texto 2.

De ahí que el departamento de mantenimiento de la empresa se ha visto envuelto siempre en retos debido al gran compromiso de mantener el correcto funcionamiento la maquinaria e instalaciones de la empresa. Aumentar la productividad, disminuyendo tiempos de parada innecesarios es el objetivo principal de departamento de mantenimiento, por lo que se ha llevado a cabo varias tareas de mantenimiento predictivo de manera que se garantice la disponibilidad operacional de la planta, por lo tanto, el mantenimiento predictivo ha llegado a ser uno de los procesos claves para el departamento debido a que utiliza técnicas de mantenimiento basado en la condición ayudando así a prolongar el ciclo de vida sus máquinas.

### 1.1.2 Importancia y alcance

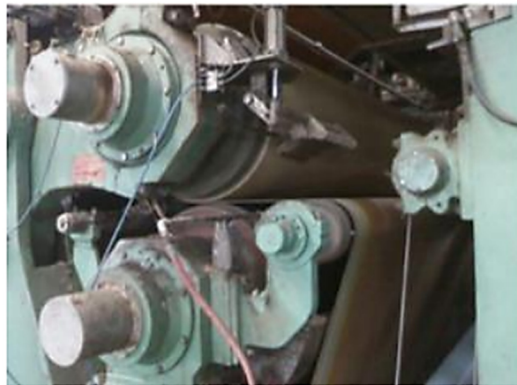
En la actualidad las técnicas de mantenimiento predictivo que emplea la empresa en su plan son: termografía, tribología y análisis de vibraciones. En la planta, el análisis de vibraciones es realizado mediante subcontratación de una empresa externa con un periodo de 6 meses e inspecciones internas semanales, las mismas que son ejecutadas por los técnicos de la empresa de manera auditiva. El informe técnico del análisis de vibraciones entregado por la empresa externa contiene los siguientes puntos: descripción y nombre del equipo, un mapeo del monitoreo realizado, valores de medición en cada punto de control y por último lleva un diagnóstico del estado de severidad de cada equipo. Si bien toda esta información está organizada dentro del historial de mantenimiento, no se la está vinculando al proceso al plan de mantenimiento predictivo programado mediante un software, mismo que genera órdenes de trabajo, que al no incluir los parámetros del análisis de vibraciones no pueden garantizar confiabilidad, cabe recalcar que dicho plan e informe técnico no consta con un previo análisis de criticidad de equipos, siendo este uno de los criterios básicos para el análisis y mantenibilidad operacional de los mismos.

En un informe emitido en marzo del 2017 por Edison Pacheco [3] y David Chingal [4] que tuvo como objetivo la adquisición de señales de vibración en los rodamientos del lado transmisión en los grupos de secado uno y dos de la máquina papelera se tiene como constancia los históricos generados por la empresa externa encargada del AV desde el año 2013 hasta el 2016, los cuales revelaron el curso de severidad que tiene el estado de las máquinas de los grupos de secado ya mencionados donde se han realizado 11 cambios de rodamientos de lo que va hasta el año 2016.

El primer cambio se lo realizó en año 2008, el segundo en el 2013, en el 2014 se reportaron dos cambios de rodamientos, en el 2015 hubo 4 cambios de rodamientos y en el 2016 se reportaron 3 cambios más, estos cambios se han ido incrementando cada vez debido a que tiene 26 años de trabajo. Se halló también que la principal causa de daños en los rodamientos es la falta de lubricación, produciendo fallos en pista interna y sus elementos rodantes, generando vibración. En el lado transmisión es donde se ha producido el mayor número de cambios de rodamiento. Mas tarde, al emplear la norma ISO 10816 se determinó que los grupos de secadores son máquinas de tamaño medio, clase II. Se detectan seis secadores en condiciones normales y seis en condiciones aceptables en estos últimos es recomendable mantener un seguimiento constante para evitar realizar paros no programados. Los fallos más comunes que se detectan son en pista interna y externa.

Sin embargo, se constató que los datos que se proporcionaron en dicho informe técnico por parte de la empresa contratada se evidencian sus diagnósticos no fueron acertados, es decir al momento de las inspecciones y desmontar los rodamientos estaban muchos de ellos en óptimas condiciones.

Esto demuestra que al tener fallos que se generan en maquinaria rotativa es necesario que se realicen las técnicas de mantenimiento predictivo como el AV de manera correcta para que brinden parámetros confiables e integrarlo al plan de mantenimiento predictivo. Al igual que en la sección de secadores, en la sección de prensas no existe la integración del análisis de vibraciones al plan de mantenimiento predictivo mismo que es una prioridad para el departamento de mantenimiento. En la Figura 2, se puede observar los rodillos de la prensa uno a ser intervenida.



**Figura 2.** Rodillos de prensa Gorostidi 1 [5].

### **1.1.3 Delimitación**

Con la incorporación de la técnica de monitoreo de la condición de análisis de vibraciones al actual plan de mantenimiento predictivo de la empresa CARTOPEL se pretende apoyar la mantenibilidad y disponibilidad de los rodillos de las prensas uno y dos en el molino de CARTOPEL S.A.I.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 Objetivo General**

Realizar la propuesta de integración del análisis de vibraciones al plan de mantenimiento predictivo de los rodillos de las prensas 1 y 2 en el molino de CARTOPEL S.A.I.

### **1.2.2 Objetivo Específico**

- Caracterizar el plan de mantenimiento predictivo de las prensas 1 y 2 y dos del molino en CARTOPEL S.A.I.
- Determinar los elementos críticos de las prensas 1 y 2 mediante el análisis del modo y efecto de fallas.
- Realizar el análisis de vibraciones de los rodillos de las prensas 1 y 2 del molino.
- Determinar los parámetros necesarios para la integración del análisis de vibración de los rodillos de las prensas 1 y 2 al plan de mantenimiento predictivo del molino en CARTOPEL S.A.I.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 MANTENIMIENTO

Se define habitualmente mantenimiento como el conjunto de técnicas destinadas a conservar equipos e instalaciones en servicio durante el mayor tiempo posible buscando la más alta disponibilidad y con el máximo rendimiento. Es absolutamente necesario para su aplicación el saber y el saber hacer, conocer lo relacionado con el aspecto teórico del mantenimiento no tiene ninguna importancia si no se le da el sentido que tiene su aplicación en la solución de problemas que se presentan con frecuencia en las empresas. En la Figura 3, se presenta un esquema que muestra la clasificación del mantenimiento, teniendo como grupos principales a dos grupos divididos en línea temporal de un pre y post falla. El primero, un estatus preventivo conlleva estrategias para prevenir cualquier falla que se pueda presentar, es decir actúa antes de la falla, y luego tenemos un estatus correctivo, mismo que tiene como fundamento actuar una vez que se ha producido una falla [6].

Dentro de las estrategias del mantenimiento preventivo se encuentra el mantenimiento preventivo y el predictivo; contrario a las del mantenimiento correctivo donde las estrategias son el mantenimiento detectivo y correctivo, obsérvese la Figura 3.

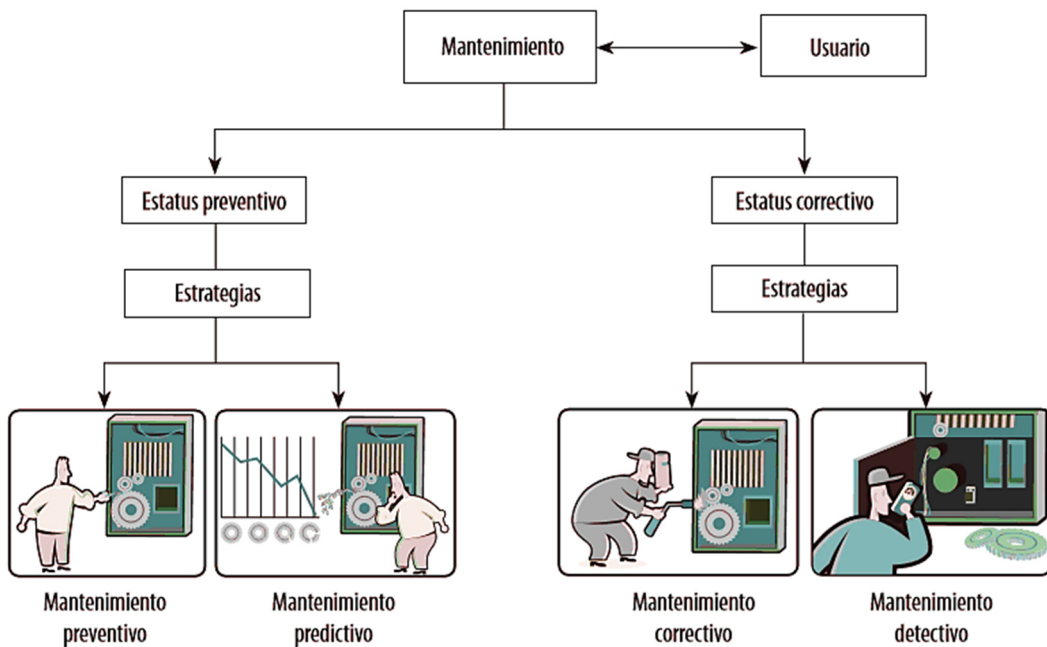


Figura 3. Taxonomía del Mantenimiento [6].

La meta más importante de cualquier programa de mantenimiento es la eliminación de algún desarreglo de la maquinaria. Muchas veces una avería grave causará daños serios periféricos a la máquina, incrementando los costos de reparación. Una eliminación completa no es posible en la práctica en ese momento, pero se le puede acercar con una atención sistemática en el mantenimiento. El segundo propósito del mantenimiento es de poder anticipar y planificar con precisión sus requerimientos. Eso quiere decir que se pueden reducir los inventarios de refacciones y que se puede eliminar la parte principal del trabajo en tiempo extra. Las reparaciones a los sistemas mecánicos se pueden planificar de manera ideal durante los paros programados de la planta. El tercer propósito es de incrementar la disponibilidad para la producción de la planta, por medio de la reducción importante de la posibilidad de algún paro durante el funcionamiento de la planta, y de mantener la capacidad operacional del sistema por medio de la reducción del tiempo de inactividad de las máquinas críticas. Idealmente, las condiciones de operación de todas las máquinas se deberían conocer y documentar. El último propósito del mantenimiento es de permitir al personal de mantenimiento el trabajar durante horas de trabajo predecibles y razonables [7].

El objetivo final del mantenimiento industrial se puede sintetizar en los siguientes puntos [8]:

- Evitar, reducir, y en su caso, reparar, los fallos sobre los bienes
- Disminuir la gravedad de los fallos que no se lleguen a evitar
- Evitar detenciones inútiles o paros de máquinas
- Evitar accidentes
- Evitar incidentes y aumentar la seguridad para las personas
- Conservar los bienes productivos en condiciones seguras y preestablecidas de operación
- Reducir costes
- Alcanzar o prolongar la vida útil de los bienes

### **2.1.1 Mantenimiento Predictivo**

El mantenimiento es el conjunto de técnicas que permiten un sistema ser más eficiente mediante el monitoreo de algunos parámetros fundamentales que indican las condiciones operacionales de los sistemas mecánicos. De forma incipiente es como aparecen la mayoría de los fallos en las máquinas, en un grado en que es posible su detección antes que el mismo se convierta en un hecho consumado con repercusiones irreversibles tanto en la producción como en los costes de mantenimiento. Por ello establecer los parámetros que permitan el

seguimiento de fallos iniciales que informen sobre deterioro temprano para cotejar valores normales de operación de los considerados anormales [9].

Algunos de estos parámetros pueden ser por ejemplos: la temperatura, la presión, la velocidad lineal, la velocidad angular, la resistencia eléctrica, los ruidos y vibraciones, la rigidez dieléctrica, la viscosidad, el contenido de humedad, de impurezas y de cenizas en aceites aislantes, el espesor de chapas, el nivel de un fluido, u otros medibles. Con el monitoreo de estos parámetros se trata de monitorear la condición de la maquinaria para tomar acciones antes que se llegue a la parada de la máquina. Por lo que el monitoreo de condición permite contar con un registro de parámetro monitoreado siendo esto sumamente útil ante fallos repetitivos; puede programarse la reparación en algunos casos, junto con la parada programada del equipo y existen menos intervenciones de la mano de obra en mantenimiento [8].

La actividad de reparar fallas y de efectuar una rutina de mantenimiento preventivo vuelve al sistema a su estado de disponibilidad y esto ocasiona pérdida de tiempo y aumento de costos [10]. Otras de las ventajas de mantenimiento predictivo son la determinación óptima del tiempo para realizar el mantenimiento preventivo, la ejecución sin interrumpir el funcionamiento normal de equipos e instalaciones, por ende, mejora el conocimiento y el control del estado de los equipos. Por lo contrario, el mantenimiento predictivo tiene como desventaja que se requiere personal mejor formado e instrumentación de análisis costosa, no es viable una monitorización de todos los parámetros funcionales significativos, por lo que pueden presentarse averías no detectadas por el programa de monitoreo de la condición [11]. Algunas de las aplicaciones más comunes del mantenimiento predictivo en la industria son: maquinaria rotativa, motores eléctricos, equipos estáticos, instrumentación, por lo general todos estos son equipos críticos en la empresa [12].

### **2.2.2 Técnicas de mantenimiento predictivo**

En el mantenimiento predictivo, se evalúa el estado de la maquinaria mediante técnicas que consisten en análisis y medidas, que se realizan con objeto de pronosticar futuras fallas o fallas incipientes, para reducir costes y accidentes laborales que sean productivos para la empresa [13].

Las técnicas de mantenimiento predictivo son un conjunto de técnicas que debidamente seleccionadas permiten el seguimiento y examen de ciertos parámetros característicos del

equipo en estudio, que manifiestan algún tipo de modificación al aparecer una anomalía en el mismo. Se precisa por esto establecer un seguimiento de aquellos parámetros que puedan avisar del comienzo de un deterioro y establecer para cada uno de ellos que niveles a admitir como normal y no admisible, de tal forma que su detección desencadene la actuación pertinente [14].

En la Tabla 2, se presentan algunas de las técnicas de mantenimiento predictivo más usadas en la industria.



**Tabla 2.** Técnicas de Mantenimiento Predictivo.

<b>Técnica</b>	<b>Descripción</b>
<b>Inspección visual</b>	<p>En esta técnica se pueden utilizar instrumentos complejos como microscopios, endoscopios o incluso lámparas y también se puede dar una simple inspección visual, algunos de los fallos que se pueden detectar son: fisuras, desgaste, soltura de elementos de fijación, cambios de coloración y otros. Se aplica en partes que sean de fácil acceso, sin embargo, se están desarrollando ya algunos procedimientos que permitan observar partes inaccesibles de las máquinas sin necesidad de desmontar [15].</p>
<b>Líquidos penetrantes</b>	<p>Esta técnica basada en el principio de capilaridad consiste en la aplicación de tinturas líquidas especiales a la superficie que se desee inspeccionar para así encontrar fisuras superficiales o fallos internos del material y otras discontinuidades abiertas a la superficie independientemente de la geometría del material. Se usa con los materiales no porosos como metales, cerámicos vidrios, plásticos [16][17][18].</p>
<b>Partículas magnéticas</b>	<p>Esta técnica basada en la acumulación de partículas de material ferromagnético permite examinar materiales de alta permeabilidad magnética en su mayoría los aceros no así en el caso de cobre, zinc aluminio o aceros austeníticos y permite detectar grietas y otras discontinuidades ya sean de tipo superficial o próximas a la superficie [19][20].</p>

**Tabla 2. Continuación de la tabla anterior**

**Termografía**

Esta es una de las técnicas menos costosas para la determinación de pérdidas de calor que en la industria significan pérdidas económicas y menor rendimiento de la maquinaria, el instrumento que se usa para tomar las imágenes es la cámara termográfica que genera una imagen de radiación infrarroja a partir de la temperatura superficial de las máquinas. Al comparar de manera periódica lecturas de la cámara se compara con el perfil de temperatura de condiciones normales de la máquina y se puede detectar si hay alguna anomalía o algún tipo de fallos [21][22][23].

**Ultrasonido**

Se utiliza principalmente en la detección de fisuras por fatiga o corrosión, permite la detección de fallos que mediante otras técnicas podrían pasar inadvertidos, este sistema se diseña bajo algunos principios: una unidad que se encarga de excitar el transductor, otra que se ocupa de recibir los ecos que lleguen a él, un bloque que los procesa y un sistema de exhibición de resultados [9][24].

**Análisis de lubricantes**

Esta técnica consiste en analizar la película del lubricante ya que esta al desaparecer o disminuir provoca desgaste, aumento de fuerzas de rozamiento y altas temperaturas que originan dilataciones en el material o su fusión [25].

**Inspección radiográfica**

Esta técnica tiene como propósito detectar defectos macroscópicos en el interior de soldaduras u otros materiales, se basa en la radiación ionizante de películas radiográficas producida por rayos x portátiles de grado industrial [26][27].

**Análisis de vibraciones**

Esta técnica se emplea para corregir problemas que las vibraciones mecánicas originan, mediante el estudio de su comportamiento, usando por lo general la transformada de Fourier que logra pasar del dominio del tiempo a la frecuencia. Se utilizan para su medición algunos instrumentos como acelerómetros, u otros especialmente diseñados para el análisis completo. Se trata de manera especial esta técnica en el apartado 0. [28][29].

## 2.2 VIBRACIONES

### 2.2.1 Definición de vibración

En términos muy simples una vibración es un movimiento oscilatorio de pequeña amplitud. Todos los cuerpos presentan una señal de vibración en la cual plasman cada una de sus características. De acuerdo con esto, las máquinas presentan su propia señal de vibración y en ella se encuentra la información de cada uno de sus componentes. Por tanto, una señal de vibración capturada de una máquina significa la suma vectorial de la vibración de cada uno de sus componentes [30]. En conclusión, las vibraciones son oscilaciones de un cuerpo cualquiera con respecto a un punto de referencia [31].

Otro concepto de vibraciones más general, está dado por la norma ISO 2041 que en relación con la terminología de vibraciones se establece que: vibración es toda variación en el tiempo, de una magnitud que describe el movimiento o la posición de un sistema mecánico, cuando esta magnitud es alternativamente mayor o menor que cierto valor promedio o de referencia [32].

Ya ubicados en un contexto más industrializado, la vibración es el movimiento de vaivén de una máquina o elemento de ella en cualquier dirección del espacio desde su posición de equilibrio, generalmente, la causa de la vibración reside en problemas mecánicos como son: desequilibrio de elementos rotativos, desalineación en acoplamientos, engranajes desgastados o dañados, rodamientos deteriorados, fuerzas aerodinámicas o hidráulicas y problemas eléctricos [33]. La vibración más sencilla posible es la del tipo senoidal, cuya representación gráfica en función del tiempo (señal temporal) puede verse en la Figura 4 [34].

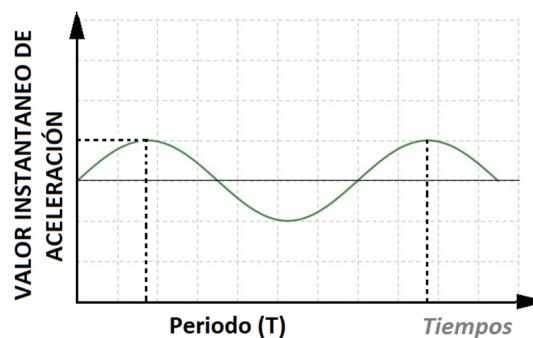


Figura 4. Representación de la vibración: forma de onda senoidal.

## 2.2.2 Características de la vibración

Las características más importantes de las vibraciones son: frecuencia, desplazamiento, aceleración.

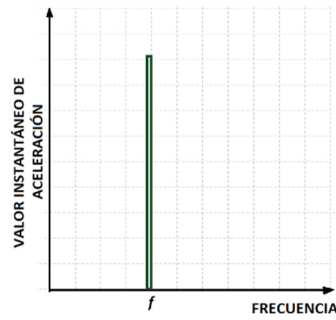
### 2.2.2.1 Frecuencia

La frecuencia se define como el número de ciclos completos en un período de tiempo, la unidad característica es cpm (ciclos por minuto) existe una relación importante entre frecuencia y velocidad angular de los elementos rotativos. La correspondencia entre cpm y rpm (ciclos por minuto-revoluciones por minuto) identificará el problema y la pieza responsable de la vibración. Esta relación se debe a que las fuerzas cambian de dirección y amplitud de acuerdo con la velocidad de giro. Los diferentes problemas son detectados por las frecuencias iguales a la velocidad de giro o bien múltiplos suyos. Cada tipo de problema muestra una frecuencia de vibración distinta. La amplitud de la vibración indica la importancia, gravedad del problema, esta característica da una idea de la condición de la máquina, se podrá medir la amplitud de desplazamiento, velocidad o aceleración. La velocidad de vibración tiene en cuenta el desplazamiento y la frecuencia, esto lo convierte en un indicador directo de la severidad de vibración. Para frecuencias inferiores a los 600cpm se mide desplazamiento, en el intervalo entre 600 cpm y 60000 cpm se mide velocidad, por último, para altas frecuencias, mayores a 60000 cpm se miden aceleraciones [33].

Frecuencia de excitación: es la frecuencia (Hz) asociada a una acción exterior actuante sobre el sistema mecánico a estudio y que varía armónicamente en un problema de vibraciones forzadas debidas a una excitación armónica. Si  $\omega$  es la frecuencia natural del sistema y  $\acute{\omega}$  la de excitación, a la relación entre ambas frecuencias se le llama  $\beta$  donde [35]:

$$\beta = \frac{\acute{\omega}}{\omega} \qquad \text{Ecuación 1}$$

En la Figura 5, se observa un espectro de vibración de la onda senoidal (representada en la Figura 4, en dominio del tiempo) que a través del FFT (Transformada rápida de Fourier) se logra convertirla al dominio de la frecuencia.



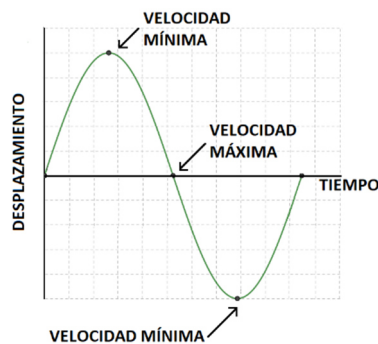
**Figura 5.** Espectro frecuencial de una onda senoidal.

### 2.2.2.2 Desplazamiento

El desplazamiento es sencillamente la distancia al objeto desde una posición de referencia o punto de equilibrio. Aparte de un desplazamiento variable, un objeto que vibra presenta una velocidad y una aceleración variables [36].

### 2.2.2.3 Velocidad

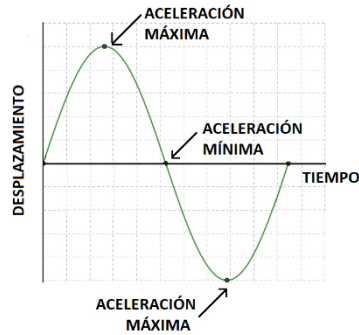
La velocidad se define como la variación en el desplazamiento y se mide por lo general en in/s (pulgadas por segundo) o mm/s [36].



**Figura 6.** Gráfica de la velocidad de un objeto que vibra.

### 2.2.2.4 Aceleración

La aceleración se define como la variación en la velocidad y se mide en g (la aceleración promedio debida a la gravedad en la superficie de la tierra) o  $\text{mm/s}^2$  [36].



**Figura 7.** Gráfica de la aceleración de un objeto que vibra.

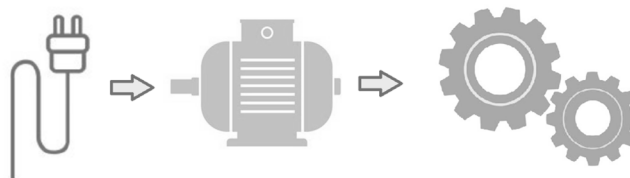
## 2.3 VIBRACIONES EN MAQUINARIA ROTATIVA

### 2.3.1 Maquinaria rotativa

Una máquina rotativa consta de un rotor (compuesto por un eje y discos), y rodamientos con carcasas asociadas que soportan el rotor. En las máquinas rotativas se producen las vibraciones debido a que se da algún tipo de variación en su fuente, generalmente la velocidad de giro múltiplos o submúltiplos de esta, cada fuente genera una única frecuencia y un único patrón de frecuencia determinados. El tipo de excitación que generalmente desarrollan las máquinas rotatorias es de tipo armónico y producen fuerzas de desbalanceo que, para determinarlas es necesario conocer la masa rotatoria y la excentricidad entre el centro de rotación y el centro de gravedad de la masa rotatoria.

### 2.3.2 Funcionamiento

La maquinaria rotativa generalmente se divide en dos grandes grupos: los generadores que son máquinas que funcionan transformando la energía mecánica en energía eléctrica y por otro lado están los motores que son aquellos que básicamente reciben energía eléctrica y la transforman en energía mecánica; en la Figura 8, se observa un esquema de esto.



**Figura 8.** Principio de funcionamiento de maquinaria rotativa (Motores).

## **2.4 ANÁLISIS DE VIBRACIONES**

El análisis de vibraciones es un método no intrusivo para monitorear la condición del activo durante el arranque, tiempos fuera de servicio y en operación diaria. Es usado principalmente en equipos rotativos como turbinas de vapor y gas, bombas, motores, compresores, máquinas de papel, trenes de laminación, máquinas herramientas y cajas de engranajes [18].

Todas las máquinas presentan algunos niveles de vibración cuando se encuentran en funcionamiento, considerados como normales, cuando se predice una avería el nivel de vibración cambia lo cual indica que algo no está funcionando correctamente y que es momento de realizar una revisión, debido a que existe una relación causa y efecto entre las vibraciones y las averías, cada máquina posee en sus condiciones normales de funcionamiento una curva vibratoria característica, tal como el ser humano tiene un electrocardiograma característico. Cuando una avería comienza a desarrollarse el comportamiento dinámico de la máquina se altera y consecuentemente también se altera su señal de vibración, por lo que se hace necesario conocer los datos específicos de la máquina como velocidad de giro, el tipo de cojinetes, de correas, el número de alabes, palas u otros con esta información básica se puede fundamentar en que máquina se realizara la revisión y el equipo analizador [17].

Entonces se puede entender que el nivel de vibración de un equipo indica el estado de la máquina, convirtiéndose en un buen índice para determinar si se va a presentar algún tipo de falla, la interpretación de las señales de vibración facilitará la identificación del lugar y el tipo de fallo que se esté presentando, basándose en los niveles de tolerancia de la máquina dado por el fabricante o las normas técnicas.

## **2.5 NORMATIVA PARA ANÁLISIS DE VIBRACIONES**

Mediante la Organización Internacional de Normalización (ISO) se establece que hay ciertos estándares que contienen especificaciones técnicas que se deben cumplir al realizar el análisis de vibraciones de los equipos. Estándares para la medición y evaluación de severidad de la vibración, dentro de los cuales están dos grandes grupos, los estándares de ensayo de aceptación de máquinas y los estándares para monitoreo de la vibración durante la operación de las máquinas. El primero contiene los requerimientos vibratoriales de las máquinas en la etapa de puesta en marcha y el segundo contiene parámetros para la evaluación de la condición de máquinas mediante sus valores de vibración.

La Norma ISO 20816 [22], que forma parte del primer grupo, es un documento que establece las condiciones y los procedimientos de manera general para realizar la medición y evaluación de vibraciones en pizas giratorias y no giratorias y maquinaria no recíproca. Los criterios generales de evaluación, que se presentan en términos de magnitud de vibración y cambio de vibración, se relacionan con tanto la supervisión operativa como las pruebas de aceptación. También se presentan directrices para establecer límites operativos.

A continuación, se presentan algunas recomendaciones para la evaluación y otros puntos importantes que se han tomado en cuenta para este trabajo.

### **2.5.1 Rango de frecuencia**

Para tener un adecuado espectro de frecuencias que sea adecuado, la medición de la vibración debe ser de banda ancha. Dependiendo del tipo de maquinaria que se vaya a analizar se deberá considerar al rango de frecuencia es decir por ejemplo si el rango de frecuencia es necesario para evaluar el estado de los rodamientos de elementos rodantes se debe incluir frecuencias superiores en las máquinas que contengan solo rodamientos. Las directrices para los rangos de frecuencia de instrumentación para clases de máquina específicas se indican en las partes apropiadas de ISO 20816.

### **2.5.2 Medición de la vibración**

La medición relativa de vibración de ejes se suele realizar usando un transductor de contacto que detecte el desplazamiento vibratorio que se presente entre el eje y alguna parte estructural en el que se monte. Por otro lado, las mediciones relativas se llevan a cabo con un transductor sin contacto, que pueda detectar el desplazamiento entre el eje y la parte estructural donde se realiza el montaje.

En el caso de las mediciones absolutas de vibración del eje se llevan a cabo mediante uno de los siguientes métodos:

- Mediante una sonda de montaje en eje en la que se monta un transductor sísmico para que mida directamente la vibración absoluta del eje.
- Mediante un transductor sin contacto que mide la vibración relativa del eje en combinación con un transductor sísmico de velocidad o acelerómetro que mide la vibración de soporte. Ambos transductores se montarán juntos para que soporten el mismo movimiento absoluto en la dirección de medición.



### 2.5.3 Magnitudes y unidades de medición

La norma establece que se pueden utilizar las siguientes magnitudes de medición (el uso, la aplicación y limitaciones de estas cantidades se examinan en la Cláusula 6 de la norma):

- Desplazamiento de vibración, medido en micrómetros.
- Velocidad de vibración, medida en milímetros por segundo.
- Aceleración de vibración, medida en metros por segundo cuadrado.

Ya que no existe una relación simple entre la aceleración de banda ancha, la velocidad y el desplazamiento, tampoco entre valores pico-pico valores RMS (valor medio cuadrático) y valores de vibración se discuten de manera general en el apartado A.1 de la norma, también se define algunas relaciones entre cantidades anteriores para cuando se conoce el contenido de armónicos de la forma de onda de la vibración.

Con el fin de evitar confusiones y garantizar una interpretación correcta, es importante en todo momento identificar claramente la cantidad de medición y su unidad, por ejemplo, el desplazamiento de pico a pico en  $\mu\text{m}$  ( $1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$ ), RMS velocidad en mm/s.

Generalmente, se puede afirmar que la cantidad de medición preferida para la medición de la vibración de las piezas no giratorias es la velocidad RMS en contraste con la medición de la vibración del eje, cuyo parámetro preferido de medición es el desplazamiento de pico a pico.

Dado que la norma se aplica tanto a las mediciones relativas como a las de vibración absoluta del eje, el desplazamiento se define en la Tabla 3:

**Tabla 3.** Definición de desplazamiento según la norma 20816.

Tipo de desplazamiento	Desplazamiento absoluto	Desplazamiento relativo
Parte desplazada	Eje	Eje
Parte de referencial	Estructura soporte	Sistema de referencia inercial

### 2.5.4 Severidad de la vibración

Generalmente las posiciones de medición suelen ser en una, dos o incluso tres direcciones de manera que se obtendrán varios valores de magnitud diferentes. La gravedad de vibración o severidad se define como el máximo valor de banda ancha que sea medido bajo el soporte de la máquina y las condiciones de funcionamiento acordados.

Para la mayoría de los tipos de máquinas, un valor de severidad de vibración caracteriza su estado vibratorio, aunque en algunos casos este enfoque puede ser inadecuado y la severidad de la vibración debe evaluarse de forma independiente para las posiciones de medición en una serie de ubicaciones.

### 2.5.5 Posiciones de medición

Para determinar el comportamiento vibratorio en cada posición de medición, es necesario tomar medidas en tres direcciones mutuamente perpendiculares. Por lo general, el complemento completo de las mediciones representado en la Figura 9 y la Figura 10, solo es necesario para las pruebas de aceptación. Por lo general, se cumple el requisito de supervisión operativa realizando una o ambas mediciones en la dirección radial. Estos pueden complementarse con una medición de la vibración en la dirección axial, pero deben evaluarse únicamente en los rodamientos de empuje. Este último puede ser importante en lugares de rodamientos de empuje donde se transmiten fuerzas dinámicas axiales directas.

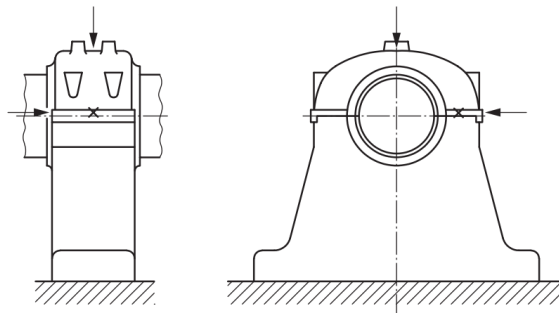


Figura 9. Puntos de medición para rodamientos de pedestal [37].

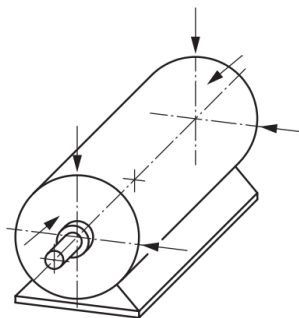
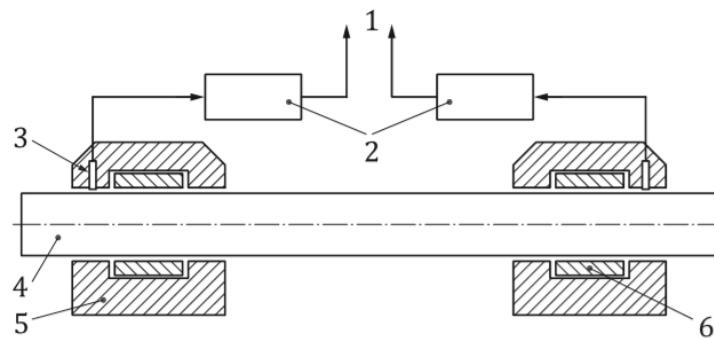


Figura 10. Puntos de medida para máquinas eléctricas pequeñas [37].

## 2.5.6 Posiciones para mediciones en ejes rotativos

En las mediciones en ejes giratorios, es debido localizar transductores en posiciones de tal forma que se pueda evaluar el movimiento lateral del eje en puntos de importancia. Se recomienda que, para las mediciones relativas y absolutas, dos transductores se encuentren en, o adyacentes a cada rodamiento de la máquina, véase la Figura 11. Deben montarse radialmente en el mismo plano transversal perpendicular al eje del eje o lo más cerca posible, con sus ejes dentro de una tolerancia de  $\pm 5^\circ$  de una línea radial. Es preferible montar ambos transductores  $90^\circ \pm 5^\circ$  aparte en la misma mitad de rodamiento y las posiciones seleccionadas deberían ser las mismas en cada rodamiento. Se puede utilizar un solo transductor en cada plano de medición en lugar del par más típico de transductores ortogonales si se sabe que proporciona información adecuada sobre la vibración del eje.



**Figura 11.** Puntos de medición para medidas en ejes rotativos [37].

Donde:

- 1 = para procesar señales
- 2 = unidades de acondicionamiento de señal
- 3 = transductores sin contacto
- 4 = eje
- 5 = chumaceras
- 6 = rodamientos

### 2.5.6.1 Posiciones para mediciones relativas de vibración del eje

Generalmente los transductores relativos del tipo sin contacto se montan en agujeros roscados en la carcasa del rodamiento mediante soportes rígidos cercanos a la carcasa del rodamiento.

Sin embargo, se pueden hacer disposiciones especiales para el montaje de transductores en otras ubicaciones axiales, pero se tendrán que utilizar diferentes criterios de vibración para la evaluación. En el caso de los transductores montados en el soporte, el soporte estará libre de frecuencias naturales que afecten negativamente a la capacidad del transductor para medir la vibración relativa del eje.

La superficie del eje en la ubicación del transductor deberá ser lisa y libre de cualquier discontinuidad geométrica, no homogeneidades metalúrgicas y magnetismo residual local que puede causar señales falsas. Se recomienda que el escurrimiento eléctrico y mecánico combinado total, medido por el transductor, no supere el 25 % del desplazamiento de vibración permitido, o 6  $\mu\text{m}$ , lo que sea mayor.

### **2.5.7 Pruebas *In-situ***

Cuando la medición se lleva a cabo in situ, la estructura de soporte debe ser la suministrada para la máquina, y es importante asegurarse de que todos los componentes principales de la máquina y la estructura estén instalados cuando se realice la prueba.

Las comparaciones válidas de vibración para máquinas del mismo tipo, pero en diferentes cimentaciones o sus fundaciones sólo pueden realizarse si las bases en cuestión tienen características dinámicas similares.

### **2.5.8 Instrumentación**

En el caso de que hubiese por ejemplo temperatura y humedad o algún otro factor ambiental influyente, la instrumentación deberá estar diseñada para que pueda soportar y trabajar en estos ambientes. En la norma ISO 2954 se indican las especificaciones necesarias para los instrumentos que se usen para la medición de la severidad de vibración mientras que en la norma ISO 20817-1 se especifican los instrumentos para medir la vibración del eje.

Uno de los puntos más importantes es garantizar que el transductor de vibración esté correctamente montado y que su presencia no afecte a las características de respuesta a la vibración de la máquina. Las especificaciones para el montaje de acelerómetros se indican en la norma ISO 5348, que son aplicables también a la velocidad transductores.

La instrumentación moderna puede proporcionar varios métodos para ofrecer un valor de medición. Los criterios de aceptación aquí se basan en la velocidad RMS en mm/s para mediciones en piezas no giratorias y desplazamiento de pico a pico en micrómetros para

mediciones en piezas giratorias. Otro de los puntos importantes en la instrumentación es que el sistema de medición tenga una disposición para la calibración en línea de la lectura y, además, tiene salidas aisladas adecuadas para permitir un análisis adicional según sea necesario

### **2.5.9 Vibración absoluta del eje**

Al ser la vibración de la estructura (en la que se encuentra el montaje del transductor relativo al eje) 20% menos que la vibración relativa, la vibración del eje o la vibración absoluta del eje se la puede utilizar como medida de vibración del eje. Por lo contrario, si la vibración de la estructura en la que está el montaje del transductor es 20% o más del valor de la vibración relativa al eje se deberá medir la vibración absoluta del eje y, en caso de constatar que si es mayor se utilizara como medida de la vibración del eje.

## **2.6 ANÁLISIS DE CRITICIDAD**

Se tiene la certeza de que en una planta no todos los equipos tienen la misma importancia, de hecho, unos equipos son más importantes que otros ya sea debido a su complejidad o a la función que realice. A causa de esto y a que los recursos que una empresa para mantenimiento de la planta es limitada se debe tratar de destinar la mayor parte del capital para los equipos de mayor jerarquía, dejando una pequeña porción del reparto para los equipos con menos influencia en los resultados de producción de una empresa. Para poder diferenciar los equipos más importantes de los menos importantes se cuenta con el análisis de criticidad, el cual mediante información recabada de históricos y experticia del personal, analiza los niveles de la planta y cuantifica la criticidad de la misma, obteniendo como resultados la categorización o jerarquización de los sistemas evaluados [38]. El objetivo principal de un análisis de criticidad es lograr establecer una metodología de apoyo en la determinación de la jerarquía de procesos, sistemas y equipos de una planta, para de esta manera subdividir los elementos en secciones para que puedan ser controladas y auditables [39].

Desde el punto de vista matemático la criticidad se puede expresar como [39]:

$$\text{Criticidad} = \text{Frecuencia} \times \text{Consecuencia}$$

*Ecuación 2*

Se distingue una serie de niveles de importancia o criticidad:

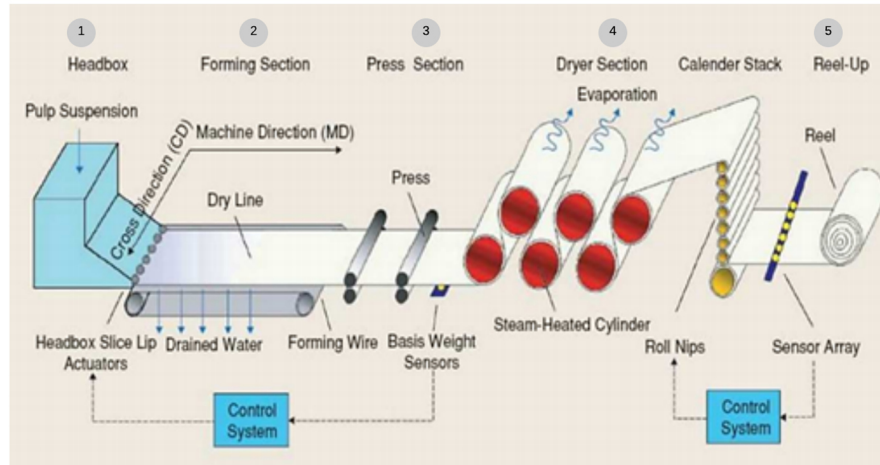
- Equipos críticos. Son aquellos equipos cuya parada o mal funcionamiento afecta significativamente a los resultados de la empresa.
- Equipos importantes. Son aquellos equipos cuya parada, avería o mal funcionamiento afecta a la empresa, pero las consecuencias son asumibles.
- Equipos prescindibles. Son aquellos con una incidencia escasa en los resultados. Como mucho supondrán una pequeña incomodidad, algún pequeño cambio de escasa trascendencia, o un pequeño coste adicional.

Opcionalmente, algunas empresas prefieren incluir una categoría más: los equipos altamente críticos. Se pretende con la introducción de esta nueva categoría distinguir entre dos tipos de equipos críticos distintos: equipos más críticos y equipos menos críticos. En segundo lugar, qué criterios podemos utilizar para clasificar cada uno de los equipos en alguna de las categorías anteriores. Se debe considerar la influencia que una anomalía tiene en cuatro aspectos: producción, calidad, mantenimiento y seguridad [40].

## **2.7 MÁQUINA PAPELERA**

El consumo de papel por parte de la población mundial es elevado por lo que se requiere el uso de maquinaria para su fabricación y para ello existe una diversidad de máquinas de papel, en la Figura 12, se muestra una representación básica de las máquinas papeleras que generalmente están integradas por los siguientes elementos:

- Caja de cabecera (1)
- Mesa de formación (2)
- Prensas (3)
- Secadores (4)
- Bobinador (5)



**Figura 12.** Esquema máquina papelera [41].

La zona húmeda de la máquina de papel está conformada por la mesa de formación, el rodillo formador y las prensas. El proceso inicia en el llamado "Headbox", que es la parte que vincula la pasta preparada y la máquina papelera. Es aquí donde se inyecta la pasta en la mesa de formación. La mesa y rodillo de formación tienen una tela que tejen las fibras de la pasta y absorben el agua (conocida como Lona), donde ya se convierte la pulpa en papel. Luego de la mesa de formación, el papel pasa a la sección de prensas donde se aplica presión en las zonas de contacto y se drena el agua desde un paño transportador (conocido como Fieltro). En caso de que el paño se llegue a saturar con agua, ésta se almacena dentro de ranuras o agujeros de la superficie de los rodillos por debajo de los paños. Algunas prensas pueden usar cámaras de vacío para extraer el agua del paño, dependiendo de los requerimientos del vaciado.

La zona seca de la máquina papelera está conformada por los grupos de secado o secadores (los cuales extraen la humedad de papel por transferencia de calor evaporando el agua restante del papel) y por el *Pope Reel* (encargado de realizar las bobinas de papel para despacharlo) [42].

CONFIDENCIAL



## 7. CONCLUSIONES

Con el presente proyecto se realizó la integración del análisis de vibraciones al plan de mantenimiento predictivo de los rodillos de prensas Gorostidi 1 y 2 en el molino de CARTOPEL S.A.I, obteniendo las siguientes conclusiones:

- El plan de mantenimiento predictivo de las prensas Gorostidi 1 y 2 del molino en CARTOPEL S.A.I. se caracterizó estableciendo las particularidades debidas, en cuanto a la situación actual de la aplicación de la técnica de monitoreo de vibraciones, la planeación del mantenimiento, los historiales y los tipos de mantenimientos realizados en dichas prensas.
- Mediante la aplicación de la metodología de análisis de criticidad a las prensas Gorostidi 1 y 2, se determinó que los elementos con una alta criticidad son los rodillos de prensa, ya que su influencia en la producción final es directa; además, que los costos de mantenimiento son más altos que el resto de los elementos de las prensas. Por ende, se justifica la necesidad de implementar el monitoreo y análisis de vibraciones de los rodillos al plan de mantenimiento predictivo.
- El análisis de vibraciones en los rodillos de las prensas Gorostidi 1 y 2 se realizó siguiendo la metodología de la Norma ISO 10816, para lo cual ha sido necesario establecer una ruta de vibración, identificación de frecuencias características y un análisis de la tendencia de las vibraciones registradas a lo largo de un periodo de 5 años. Esto ha permitido comprender cual es el comportamiento normal de los rodillos en cuanto al nivel de vibración que presentan a lo largo del tiempo. Puesto que el nivel de vibración está directamente relacionado con la presencia de los fallos, también permitirá mejorar la confianza en los diagnósticos y pronósticos de mantenimiento que se realicen en un futuro.
- Los parámetros necesarios para la integración del análisis de vibración de los rodillos de las prensas Gorostidi 1 y 2 al plan de mantenimiento predictivo del molino en CARTOPEL S.A.I. se determinaron al establecer una propuesta de monitoreo de la condición basada en la Norma ISO 17359, misma que tuvo como objetivo principal presentar una estrategia adecuada de mantenimiento basado en el monitoreo de las vibraciones, para que el departamento de mantenimiento pueda determinar oportunamente el estado operativo de los rodillos de prensa.

## **8. RECOMENDACIONES**

Se recomienda optimizar y mejorar tecnológicamente el proceso de adquisición y monitoreo de las vibraciones, con la implementación de un software comercial de análisis de vibraciones y de instrumentos de medición (acelerómetros) inalámbricos. Para fundamentar esta recomendación en el Anexo X se presenta una propuesta de los equipos y el software de análisis que se puede implementar en el departamento de mantenimiento del Molino de CARTOPEL S.A.I.

Capacitar el personal en temas de análisis de vibraciones en especial el personal que realiza las inspecciones de lubricación.

## **9. TRABAJOS FUTUROS**

-Implementación de la actual propuesta de análisis de vibraciones de las prensas Gorostidi 1 y 2 al sistema informático de mantenimiento de CARTOPEL S.A.I.

-Implementación de un sistema de mantenimiento predictivo basado en el análisis de vibraciones en línea de los rodamientos críticos del molino.

-Realizar una propuesta de mantenimiento predictivo basado en análisis de vibraciones para el resto de los equipos críticos del molino papelerero.

## 10. BIBLIOGRAFÍA

- [1] R. D. E. M. Primas, «Proceso de fabricación de papel en molino Cartopel», 2010.
- [2] «Cartopel S.A.I. - Reseña histórica». [http://www.cartopel.com/ords/f?p=102:15:::::P0\\_V\\_ID\\_IDIOMA\\_NR,P0\\_V\\_ID\\_PAGINA\\_NR,P0\\_V\\_ID\\_MENU\\_NR,P15\\_V\\_RST\\_YN:1,121,246,1](http://www.cartopel.com/ords/f?p=102:15:::::P0_V_ID_IDIOMA_NR,P0_V_ID_PAGINA_NR,P0_V_ID_MENU_NR,P15_V_RST_YN:1,121,246,1) (accedido jul. 15, 2019).
- [3] E. Pacheco, «Formato de ambientación e informe final Pasantías Cartopel.», vol. 1, p. 7, 2017.
- [4] D. Chingal, «Fase 3 del proyecto Gestión de Instalación de acelerómetros uno y dos el lado de transmisión», 2017.
- [5] C. Barrera, X. Felipe, C. Aucapiña, y J. Ernesto, «Diseño de una máquina Skiving Line # 3 para la empresa Cartopel S.A.I. ubicado en la zona de conversión», 2015.
- [6] J. Cárcel, *La gestión del conocimiento en la ingeniería del mantenimiento industrial*. Valencia: OmniaScience, 2014.
- [7] G. White, «Introducción al Análisis de Vibraciones Azima DLI», vol. 1, 2010.
- [8] C. Y. Objetivos y D. E. L. Mantenimiento, «Autor :Ma. Belén Muñoz Abella», vol. 1, pp. 3-47.
- [9] L. Romero, *Gestión del mantenimiento de instalaciones de energía eólica*. Vértice, 2012.
- [10] A. Sánchez, «Técnicas De Mantenimiento Predictivo. Metodología De Aplicación En Las Organizaciones», *Development*, vol. 1, n.º 4, p. 72, 2017.
- [11] E. Orcón, «Propuesta de un plan de MPP basado en el análisis vibracional caso: Sistema de bombeo, unidad de espesadores del proyecto Toromocho», 2015.
- [12] I. N. G. Edgar y P. Alvarez, «Diseño del plan de mantenimiento correctivo y preventivo para los equipos móviles y fijos de la empresa Mirasol S.A», pp. 1-92, 2014.
- [13] S. Meza, «Consideraciones generales de Agip Oil Ecuador B . V .», 2000.
- [14] A. Kelly y M. J. (M. J. Harris, *Técnicas de mantenimiento industrial*. Newnes-Butterworths, 1978.
- [15] A. Cruz, «Implementación del Mantenimiento Predictivo en la empresa Agr- Rackend», 2011.
- [16] I. Raisa, «Inspección con líquidos penetrantes». <http://raisainspecciones.com/index.php/servicios/inspeccion-con-liquidos-penetrantes> (accedido jul. 16, 2019).
- [17] F. C. Gómez de León, *Tecnología del mantenimiento industrial*. Universidad de Murcia, 1998.
- [18] R. Echevarria, «Líquidos Penetrantes». Buenos Aires, p. 69, 2003.

- [19] Tuv Nord Cualicontrol, «Partículas Magnéticas MT Ensayos no Destructivos». <https://www.tuv-nord.com/es/es/inspeccion-industrial/ensayos-no-destructivos/particulas-magneticas-mt/> (accedido jul. 16, 2019).
- [20] J. Villasis Soria, «Ensayos no destructivos: partículas magnéticas», 2011.
- [21] A. Muñoz Potosi, L. Pencue Fierro, y J. León Téllez, «Análisis termográfico para la determinación de puntos críticos en equipos mecánicos y eléctricos», *Rev. Fac. Cienc. Básicas*, vol. 7, n.º 1, pp. 96-100, 2009.
- [22] W. Olarte, M. Botero, y B. Cañon, «Técnicas de Mantenimiento Predictivo utilizadas en la industria», *Sci. Tech.*, vol. XVI, n.º 45, pp. 223-226, 2010.
- [23] FLIR Systems AB., «Guía de termografía para mantenimiento predictivo», p. 45, 2011, doi: 10.3201/eid2305.161315.
- [24] Jamime. Sandoval. S. del p ila Matinez, Jairo. Vitola, «Fundamentos teórico-prácticos del ultrasonido», 2007.
- [25] L. Buchelli Carpio y V. Garcia Granizo, «Detección temprana de fallas en motores de combustión interna a diesel mediante la técnica de análisis de aceite», *Cienc. Unemi*, vol. 8, n.º 15, p. 84, 2018, doi: 10.29076/issn.2528-7737vol8iss15.2015pp84-95p.
- [26] H. Ruiz Caballero, «Inspección radiográfica de soldaduras», p. 183, 1993.
- [27] spectrum-ndt, «Industrial radiographic testing». [https://www.spectrum-ndt.gr/industrial radiographic testing](https://www.spectrum-ndt.gr/industrial-radiographic-testing) (accedido jul. 16, 2019).
- [28] L. J. Miguel Gonzalez, «El análisis de vibraciones en el mantenimiento predictivo.», *Téc. Ind. Madr.*, n.º 217, pp. 31-35, 1995.
- [29] T. D. E. Graduaci y P. P. La, «Programa de mantenimiento predictivo por análisis de vibraciones en equipos críticos de la industria azucarera», 2005.
- [30] A. Maquinaria, «Tutorial de vibraciones para mantenimiento mecánico realizado por amaq s.a. análisis de maquinaria», 2005.
- [31] J. E. M. Morales, «Análisis De Vibraciones En Motores Eléctricos Asíncronos Trifásicos», pp. 32-34, 2009.
- [32] F. O. R. Standardization y D. E. Normalisation, «International Standard Iso», vol. 1987, 1987.
- [33] F. Torres, J. Royo, y G. Rabanaque, «Análisis de vibraciones e interpretación de datos», *DIDYF Univ. Zaragoza*, pp. 1-14, 2015.
- [34] E. M. Villanueva, «Vibraciones mecanicas», 2014. <https://es.slideshare.net/edgarm193/vibraciones-mecanicas-30554264> (accedido jul. 24, 2019).
- [35] M. Rodríguez Súnico, «Análisis modal y operacional: Teoría y práctica», pp. 2-8.
- [36] C. E. Torres, «Manual de análisis de vibraciones», *Maint. Intell. LLC*, vol. 1, p. 84.

- [37] «BSI Standards Publication Mechanical vibration — Measurement and evaluation of machine vibration Part 1 : General guidelines», 2016.
- [38] S. Garrido, *Organización y Gestión Integral del Mantenimiento*. 2003.
- [39] J. C. Ramirez, H. Fernando, y } Francisco, «Elaboración De Un Análisis De Criticidad Y Disponibilidad Para La Atracción X-Treme Del Parque Mundo Aventura, Tomando Como Referencia Las Normas, Sae Ja1011 Y Sae Ja1012», p. 88, 2017.
- [40] J. L. Romero Carranza, «Análisis De Criticidad», p. 23, 2013.
- [41] E. Altamirano, «Modernización del sistema de accionamiento de la máquina de papel Kraft», vol. 67, n.º 6, pp. 14-21, 2007.
- [42] F. A. Saavedra y P. N. Saavedra, «Modelo dinámico de la zona de contacto en prensas de máquinas papeleras», *Inf. Tecnol.*, vol. 24, n.º 4, pp. 75-84, 2013, doi: 10.4067/S0718-07642013000400009.
- [43] ISO 17359:2018, *Condition monitoring and diagnostics of machines — General guidelines*. .
- [44] P. Tchakoua, R. Wamkeue, F. Slaoui-Hasnaoui, T. A. Tameghe, y G. Ekemb, «New trends and future challenges for wind turbines condition monitoring», en *2013 International Conference on Control, Automation and Information Sciences (ICCAIS)*, nov. 2013, pp. 238-245, doi: 10.1109/ICCAIS.2013.6720561.
- [45] K. Mobley, *An Introduction to Predictive Maintenance*, 2nd ed. Butterworth-Heinemann, 2002.
- [46] J. Ortiz, «Mantenimiento Predictivo». Tecsup, 2017, Accedido: abr. 22, 2020. [En línea]. Disponible en: [https://www.academia.edu/17524559/Mantenimiento\\_Predictivo](https://www.academia.edu/17524559/Mantenimiento_Predictivo).
- [47] Y. Qian, R. Yan, y S. Hu, «Bearing Degradation Evaluation Using Recurrence Quantification Analysis and Kalman Filter», *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 63, n.º 11, pp. 2599-2610, nov. 2014, doi: 10.1109/TIM.2014.2313034.
- [48] Y. N. Valbuena, J. A. C. Rivera, y C. S. O. F. Cediél, «Caso de Estudio: Metodología de Cálculo para Determinar la Frecuencia Óptima de Monitoreo de Equipos Eléctricos del Sector Hidrocarburos». Confipetrol S.A.S, 2018.
- [49] A. Jaafar, *Vibration Analysis and Diagnostic Guide*. 2012.
- [50] T. Barszcz, «Standard Vibration Analysis Methods», en *Vibration-Based Condition Monitoring of Wind Turbines*, T. Barszcz, Ed. Cham: Springer International Publishing, 2019, pp. 33-86.
- [51] Z. Stamboliska, E. Rusiński, y P. Moczko, *Proactive Condition Monitoring of Low-Speed Machines*. Springer International Publishing, 2015.

CONFIDENCIAL