



UNIVERSIDAD  
PRIVADA  
DEL NORTE

# FACULTAD DE INGENIERÍA

---

CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

“IMPLEMENTACIÓN DEL MANTENIMIENTO PREDICTIVO PARA LOS EQUIPOS CRÍTICOS DEL PROCESO DE SECADO EN UNA EMPRESA PAPELERA”

Trabajo de suficiencia profesional para optar el título profesional de:

**Ingeniero Industrial**

**Autor:**

Edinson Rodolfo Mata García

**Asesor:**

Ing. Rembrandt Ubalde Enríquez

Lima – Perú

2016

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

APROBACIÓN DEL TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL .....	2
DEDICATORIA .....	3
AGRADECIMIENTO .....	4
ÍNDICE DE CONTENIDOS .....	5
ÍNDICE DE TABLAS .....	8
ÍNDICE DE FIGURAS .....	8
RESUMEN.....	10
ABSTRACT .....	12
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	13
1.1. Antecedentes .....	13
1.2. Justificación.....	15
1.2.1. Objetivo.....	15
1.2.2. Objetivos Específicos .....	15
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO .....	16
2.1. Evolución del mantenimiento .....	16
2.1.1. Primera generación .....	16
2.1.2. Segunda generación.....	17
2.1.3. Tercera generación.....	17
2.2. Mantenimiento predictivo .....	19
2.3. Costo beneficio .....	21
2.4. Colector / analizador de datos Microlog - SKF .....	23
2.5. Técnicas de mantenimiento predictivo.....	25
2.5.1. Análisis de Vibraciones.....	25
2.5.1.1. Clases de movimientos oscilatorios .....	25
2.5.1.2. Movimiento armónico simple.....	27
2.5.1.3. Mediciones de las vibraciones .....	28
2.5.1.4. Desplazamiento .....	29
2.5.1.5. Velocidad.....	30
2.5.1.6. Aceleración.....	31
2.5.1.7. Diagnóstico de fallas .....	32
2.5.1.8. Análisis espectral .....	33
2.5.1.9. Frecuencias de los rodamientos .....	35
2.5.1.10. Frecuencias naturales y resonancias .....	37
2.5.1.11. Sentidos de medición .....	37



2.5.1.12.	Clasificación y selección de traductores .....	38
2.5.1.13.	Espectros de vibraciones .....	41
2.5.2.	Análisis Termográfico .....	42
2.5.2.1.	Infrarrojo para monitoreo de condición .....	42
2.5.2.2.	Que es lá temperatura .....	43
2.5.3.	Análisis Estático y Dinámico de corriente Baker .....	45
2.5.4.	Análisis de Aceite .....	46
2.6.	Mantenimiento predictivo y el medio ambiente .....	47
2.6.1.	Educación ambiental para el personal de mantenimiento .....	47
2.6.2.	Mejorar el desempeño del personal de mantenimiento mediante .....	48
2.7.	Estándares internacionales .....	48
2.7.1.	Norma ISO 2372 .....	48
2.7.2.	Norma ISO 10816 .....	50
2.8.	Fabrica del Papel Tissue .....	52
2.8.1.	Proceso de secado .....	55
2.8.1.1.	Sistema de secado con aire caliente: .....	56
2.8.1.2.	Sistema de secado con vapor .....	57
2.9.	Clasificación de componentes críticos y no críticos .....	59
2.9.1.	Niveles de criticidad .....	60
2.10.	Definiciones de términos básicos .....	61
CAPÍTULO 3. DESARROLLO .....		63
3.1.	SKF del Perú .....	63
3.2.	Organización .....	64
3.2.1.	Área de Servicios .....	66
3.2.1.1.	Monitoreo de condición .....	66
3.2.1.2.	Plan de análisis de lubricante y práctica de muestreo de aceite .....	66
3.3.	Empresa papelera – Kimberly Clark .....	68
3.3.1.	Planta puente piedra .....	68
3.3.2.	Área de mantenimiento manufactura. ....	68
3.3.3.	Descripción de equipos según su criticidad .....	69
3.3.4.	Análisis de criticidad .....	71
3.3.4.1.	Mantenimiento: .....	71
3.3.4.2.	Inspección .....	71
3.3.4.3.	Repuestos e inventario .....	71
3.3.4.4.	Disponibilidad de planta .....	71
3.3.4.5.	Recurso humano .....	71
3.4.	Descripción del problema .....	74
3.4.1.	Esquema de Ishikawa causa y efecto .....	75
3.5.	Razones de utilizar el análisis vibraciones en el mantenimiento predictivo de equipos críticos .....	76
3.5.1.	El desbalance dinámico: .....	76
3.5.2.	El desalineamiento en los elementos rotativos .....	76
3.5.3.	Contaminación de equipos por fugas de pasta y condiciones de trabajo .....	76
3.6.	Parada de mantenimiento no planificada .....	77
3.6.1.	Mantenimiento no planificado .....	77



3.6.2.	Mantenimiento Preventivo .....	77
3.6.3.	Causas Externas .....	77
3.6.4.	Paradas de planta.....	77
3.7.	Actividades realizadas .....	78
3.8.	Modelo para implementación de mantenimiento predictivo.....	79
3.8.1.	Revisión de los equipos.....	81
	Identificación de equipos .....	81
3.8.2.	Revisión de criticidad y confiabilidad .....	81
3.8.3.	Selección del mantenimiento adecuado.....	81
3.8.4.	Selección del método de medición .....	81
3.8.5.	Recolección de información y análisis.....	82
3.8.6.	Determinación de tareas de mantenimiento a aplicar y hacer la retroalimentación respectiva .....	82
3.8.7.	Revisión .....	83
3.9.	Condiciones básicas para asegurar la implementación del mantenimiento predictivo .....	83
3.9.1.	Inversión .....	83
3.9.2.	Cambio cultural .....	83
3.9.3.	Habilidades del personal de mantenimiento.....	84
3.9.4.	Manejo de la información .....	84
3.9.5.	Documentación .....	84
3.9.6.	Estrategia.....	84
3.10.	Etapas de la implementación del mantenimiento predictivo en equipos críticos.....	85
3.11.	Revisión de equipos .....	86
3.12.	Selección del mantenimiento adecuado .....	87
3.13.	Recolección de información y análisis .....	87
3.14.	Determinación de los puntos de medición .....	88
3.15.	Software de diagnóstico @PTITUDE ANALYST - SKF .....	89
3.16.	Toma de datos de análisis de vibraciones.....	91
3.16.1.	Iniciar recopilación de datos .....	91
3.16.2.	Metodología de trabajo .....	92
3.16.3.	Comprobar la calibración del equipo .....	92
3.16.4.	Enviar el equipo a calibrar .....	92
3.16.5.	Compruebe el sensor y el cable .....	92
3.16.6.	Reemplace el sensor o cable .....	93
3.16.7.	Descargar rutas a DAD / computadora .....	93
3.16.8.	Viaje al sitio / primera máquina.....	93
3.16.9.	Informe al supervisor y / o las operaciones del sitio.....	94
3.16.10.	Obtener permiso para trabajar .....	94
3.16.11.	Colecte data94	
3.16.12.	Registrar las notas de inspección.....	95
3.16.13.	Informar asuntos urgentes al supervisor y / o las operaciones del sitio.....	96
3.16.14.	Ir a la oficina96	
3.16.15.	Descargar las rutas a la computadora.....	96
3.16.16.	Informar la carga de datos al analista .....	96
3.16.17.	Cerrar orden de trabajo / solicitud de trabajo. ....	97
3.17.	Reporte de análisis de vibraciones .....	97

CAPÍTULO 4. RESULTADOS .....	99
4.1. Incremento de la disponibilidad mecánica .....	99
4.2. Reducción de pérdidas de producción.....	100
4.3. Disminución de costos de mantenimiento.....	101
4.3.1. Mejora de la cultura organizacional .....	103
CAPÍTULO 5. DISCUSIÓN.....	104
CONCLUSIONES.....	105
RECOMENDACIONES .....	106
REFERENCIAS.....	107

#### ÍNDICE DE TABLAS

Tabla n.º 2-1 Medición de las vibraciones.....	29
Tabla n.º 2-2. Técnicas de Diagnóstico para Máquinas Rotativas.....	32
Tabla n.º 2-3 Análisis de los defectos en los elementos de los rodamientos .....	35
Tabla n.º 2-4 Rangos de severidad de vibraciones según la norma ISO 2372 .....	49
Tabla n.º 2-5 Rangos de severidad de vibración según la norma ISO 10816.....	52
Tabla n.º 3-1 Descripción de equipos críticos en el proceso de secado .....	69
Tabla n.º 3-2 Extracto de los equipos críticos.....	86
Tabla n.º 3-3 Rutas de monitoreo de vibraciones por semanas.....	87
Tabla n.º 5-1 Solución – Efecto - Expectativa.....	104
Tabla n.º 5-2 Costo de inversión vs Costo de ahorro .....	104

#### ÍNDICE DE FIGURAS

Figura n.º 2-1 Técnicas de mantenimiento.....	17
Figura n.º 2-2 Prácticas de mantenimiento .....	18
Figura n.º 2-3 Curva P-F .....	20
Figura n.º 2-4 Costo estrategia de mantenimiento Predictivo.....	22
Figura n.º 2-5 Costo de instalación y operación .....	22
Figura n.º 2-6 Ahorros potenciales generados por el uso del PDM.....	23
Figura n.º 2-7 Analizador de vibración.....	24
Figura n.º 2-8 Movimiento oscilatorio regular.....	26
Figura n.º 2-9 Movimiento oscilatorio regular.....	26
Figura n.º 2-10 Movimiento armónico simple.....	27
Figura n.º 2-11 Análisis de vibraciones.....	28
Figura n.º 2-12 Desplazamiento y aceleración para una velocidad constante de 0,2 pulg/seg .....	30
Figura n.º 2-13 Relaciones entre el desplazamiento, velocidad y aceleración.....	31
Figura n.º 2-14. Datos de una caja de engranajes de simple reducción de 9Mw con engranajes desgastados .....	33
Figura n.º 2-15. Defectos en los rodillos de rodamientos –pista exterior con desgaste poco profundo .....	34
Figura n.º 2-16 Pulsación de un motor eléctrico cercana a una frecuencia natural .....	34
Figura n.º 2-17.Nomenclatura de los elementos de los rodamientos .....	36

Figura n.º 2-18 Espectros típicos de falla de rodamientos .....	36
Figura n.º 2-19 Sentidos de medición .....	37
Figura n.º 2-20 Transductor de desplazamiento .....	38
Figura n.º 2-21 Transductor de velocidad .....	39

Figura n.º 2-22 Transductor piezoeléctrico .....	40
Figura n.º 2-23 Espectro de vibración sin falla en la pista externa del rodamiento .....	41
Figura n.º 2-24 Espectro de vibración con falla en la pista externa del rodamiento .....	41
Figura n.º 2-25 Espectro Termografico .....	43
Figura n.º 2-26 Termografía en motores eléctricos.....	43
Figura n.º 2-27 Termografía en partes mecánicas.....	44
Figura n.º 2-28 Camarás termográficas .....	44
Figura n.º 2-29 Equipo de análisis de corriente dinámico.....	45
Figura n.º 2-30 Análisis estático de corriente.....	46
Figura n.º 2-31 Clasificación de máquinas según la norma ISO 2372 .....	49
Figura n.º 2-32 Proceso de fabricación de papel Tissue .....	53
Figura n.º 2-33 Maquina de papel.....	54
Figura n.º 2-34 Sistema de secado de máquina de papel .....	56
Figura n.º 2-35 Diagrama de flujo del sistema de secado de una máquina de papel.....	57
Figura n.º 2-36 Diagrama de flujo de un sistema de vapor y condensado maquina papelera .....	58
Figura n.º 2-37 Definición de niveles de criticidad .....	60
Figura n.º 3-1 Estrategia de servicios .....	64
Figura n.º 3-2 Organigrama – Plataforma Servicios de SKF del Perú - Impactó en el cliente .....	65
Figura n.º 3-3 Flujograma de servicio para la empresa Kimberly Clark.....	67
Figura n.º 3-4 Matriz de criticidad planta papelera.....	72
Figura n.º 3-5 Niveles de criticidad para cada aspecto evaluado .....	73
Figura n.º 3-6 Diagrama de causa y efecto.....	75
Figura n.º 3-7 Paradas de mantenimiento no programadas antes de la implementación .....	77
Figura n.º 3-8 Flujo macro del área de servicio SKF .....	78
Figura n.º 3-9 Flujograma del mantenimiento predictivo.....	80
Figura n.º 3-10 Responsabilidades de la implementación PDM.....	85
Figura n.º 3-11 Puntos de medición en compresores/reductores.....	88
Figura n.º 3-12 Creación de rutas de vibraciones en @ptitude analyst.....	89
Figura n.º 3-13 Puntos de medición y diagnóstico de vibraciones .....	90
Figura n.º 3-14 Flujograma de toma de análisis de vibraciones .....	91
Figura n.º 3-15 Informes de análisis de vibraciones .....	98
Figura n.º 4-1 Disponibilidad de equipos después de la implementación .....	99
Figura n.º 4-2 Rodillo Yankee - Equipo crítico con disponibilidad de 97% .....	99
Figura n.º 4-3 Reducción de pérdidas de producción .....	100
Figura n.º 4-4 P11 - Equipo Critico con disponibilidad de 97% .....	100
Figura n.º 4-5 Costo VS disponibilidad .....	101
Figura n.º 4-6 Relación de mantenimientos .....	102
Figura n.º 4-7 Cultura Organizacional.....	103

## RESUMEN

La implementación de un plan de mantenimiento predictivo mediante la técnica de análisis vibraciones de una planta papelera, tiene como objetivo diagnosticar el estado técnico de los equipos críticos, para presentar un plan de mantenimiento predictivo que permita aumentar la efectividad de los equipos, y predecir a tiempo las fallas que pueden presentarse. (*Ingeniería especializada en mantenimiento predictivo.2003-WWW.preditec.com/*)

Se seleccionaron los equipos de mayor importancia con sus respectivas especificaciones de tareas predictivas adecuadas mediante análisis de criticidad y el análisis de modo y efecto de falla (AMEF).

Se obtuvo información sobre niveles de vibración y el total que se convierte en valor de comparación y análisis de fallas en motores, reductores y bombas. Como elemento básico de trabajo y diagnóstico en espectros de velocidad se aplicó lo establecido en la norma ISO 10816-3; y, para el análisis espectral de fallas en rodamientos lo indicado en las cartas de Charlotte.

Se realizó el plan de mantenimiento predictivo y su respectiva homogenización; así como también, el manual de mantenimiento proactivo en donde se detallaron los procedimientos a seguir para efectuar correctamente las inspecciones predictivas.

Se recomienda seguir las instrucciones del plan de mantenimiento; a fin de que, los equipos analizados funcionen efectivamente sin paros imprevistos; y, se alargue la vida útil del activo.

KIMBERLY CLARK es empresa líder en productos de consumo para el cuidado e higiene personal y familiar. Ofrece productos que han mejorado de manera significativa la calidad de vida de las personas como son: los pañales para niños y adultos, papel higiénico, toallas femeninas, toallitas húmedas, pañuelos faciales, servilletas, entre otros.

La Planta Puente Piedra está ubicada sobre el KM 30 de la Carretera Panamericana Norte en el distrito de Puente Piedra, a unos 25 km de la plaza de Armas de Lima. En ella se fabrica papel tissue, el cual se usa como insumo para la fabricación de: papel higiénico (Suave, Roll, Familia, Kleenex), servilletas (Scott, Familia), papel toalla de manos (Scott), papel toalla de cocina (Scott) y productos de nuestra línea institucional (Suave, Scott y Kleenex).

Se tiene frecuentes paradas imprevistas, algo costoso y relevante para el funcionamiento y eficiencia de su proceso productivo, con fuertes pérdidas en costes de mantenimiento y pérdidas de producción. Por tanto, se planteó la necesidad de establecer qué estrategia de mantenimiento, correctivo, preventivo, basada en la condición o predictivas, aplicada sobre cada uno de los activos del sitio.

Se sabe que la necesidad primaria es la reducción de costes de mantenimiento, puesto que los fallos afectaban a maquinaria muy crítica con incidencia directa en producción. Actualmente la empresa lleva una planificación de mantenimiento en equipos críticos que no satisface su buen funcionamiento, recurriendo en la mayoría de los casos a la sustitución de piezas dañadas, debido a muchas fallas imprevistas las cuales producen retrasos en la producción, alto costo de mantenimiento y pérdida de materia prima.



En vista de esta situación se pretende implementar del mantenimiento predictivo basado en el análisis de vibraciones en equipos críticos.

Con el cual se pretende evaluar el estado actual de los equipos por medio del diagnóstico de fallas potenciales e incipientes, estableciendo sus niveles de pre-alarma y alarma, niveles de banda espectral y las frecuencias de monitoreo, con el fin de mejorar los programas de mantenimiento existente y así reducir las paradas imprevistas, evitar pérdida de materia prima, minimizar los costos de mantenimiento y aumentar considerablemente la eficiencia y productividad de los equipos.

Además este mantenimiento brindará una mejor planificación a la hora de la intervención y reparación de los equipos ya que permite saber el momento adecuado para realizar la sustitución de piezas dañadas aprovechando al máximo la vida útil de éstas.

Este proyecto se tomará como base para la implementación del mantenimiento predictivo en toda la planta, teniendo en cuenta que es un proceso a largo plazo que necesita de personal técnico especializado.

Palabras Claves:

Mantenimiento predictivo, Análisis de vibraciones, máquina de papel, espectros, rodamientos, espectros de vibración, mantenimiento correctivo, termografía, análisis de corriente, ahorros, costos, parada de mantenimiento.

## ABSTRACT

The implementation of a predictive maintenance plan using the vibrational analysis technique of a paper mill, aims to diagnose the technical state of critical equipment, to present a predictive maintenance plan that allows to increase the effectiveness of the equipment, and to predict Failures that can occur

The most important equipment with their respective specifications of appropriate predictive tasks was selected by criticality analysis and the analysis of mode and effect of failure (AMEF).

Information was obtained on vibration levels and the total that becomes comparison value and fault analysis in motors, reducers and pumps. As a basic element of work and diagnosis in velocity spectra, the provisions of ISO 10816-3 were applied; And for the spectral analysis of bearing failures as indicated in Charlotte charts.

The predictive maintenance plan and its respective homogenization were carried out; As well as the proactive maintenance manual which detailed the procedures to be followed to correctly carry out the predictive inspections.

It is recommended to follow the instructions of the maintenance plan; So that the equipment analyzed works effectively without unforeseen stoppages; And, the useful life of the asset is extended.

KIMBERLY CLARK is a leading company in consumer products for personal and family care and hygiene. It offers products that have significantly improved the quality of life of people such as: diapers for children and adults, toilet paper, women's towels, wet wipes, facial tissues, napkins, among others.

Puente Piedra Plant is located on the KM 30 of the North Pan-American Highway in the district of Puente Piedra, about 25 km from the Plaza de Armas de Lima. It is made of tissue paper, which is used as an input for the production of: toilet paper (Soft, Roll, Family, Kleenex), napkins (Scott, Family), paper towels (Scott), towels Scott) and products of our institutional line (Suave, Scott and Kleenex).

It has frequent unforeseen stops, something costly and relevant for the operation and efficiency of its production process, with heavy losses in maintenance costs and production losses. Therefore, the need to establish which maintenance strategy, corrective, preventive, condition-based or predictive, applied to each of the assets of the site was raised.

**Keywords:**

Predictive maintenance, Vibration analysis, paper machine, spectra, bearings, vibration spectra, corrective maintenance, thermography, current analysis, savings, costs, maintenance shutdown.

**Nota de acceso:**

**No se puede acceder al texto completo pues contiene datos confidenciales.**

## REFERENCIAS

Thearle, E.L., "Dynamic Balancing of Rotating Machinery in the Field," Trans. ASME, 56, pp 745-753 (Oct 1934).

8.2. Eisenmann, Sr. R.C. and Eisenmann, Jr. R.C., *Machinery Malfunction Diagnosis and Correction*, Prentice Hall PRT (1998).

ALBARRACÍN AGUILON, Pedro. Mantenimiento Predictivo: Análisis de Aceites. Universidad Industrial de Santander-UIS. Posgrado en Gerencia de Mantenimiento. Cartagena, 2007.

ALLIED RELIABILITY, Inc. PdM Secrets Revealed. Boston, 2006.

BOTERO BOTERO, Ernesto. Mantenimiento Preventivo. Universidad Industrial de Santander-UIS. Posgrado en Gerencia de Mantenimiento. Cartagena, 2007.

BRITISH STANDAR - INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION BSI ISO 2041. Mechanical vibration, shock and condition monitoring. Vocabulary, 2009.

CAMPBELL, John Dixon. Maintenance Maturity Grid. PricewaterhouseCoopers, Canada.

DUARTE, Juan Carlos. Fundamentos para la gestión de mantenimiento predictivo. Seminario Aciem, 2006.

ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE (EPRI). Predictive Maintenance Self-Assessment Guidelines for Nuclear Power Plants, 2000.

GIRDHAR, Paresh. Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance. Elsevier. Oxford, 2004. 125

GONZÁLEZ BOHÓRQUEZ, Carlos Ramón. Principios de Mantenimiento. Universidad Industrial de Santander-UIS. Posgrado en Gerencia de Mantenimiento. Cartagena, 2007.

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION - ISO 14224. Petroleum and natural gas industries — Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment, 2004.

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION - ISO 13372. Condition monitoring and diagnostics of machines — Vocabulary, 2004

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION - ISO 13374 – 1. Condition monitoring and diagnostics of machines — Data processing, communication and presentation, 2003

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION - ISO 13379. Condition monitoring and diagnostics of machines — General guidelines on data interpretation and diagnostics techniques, 2003

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION - ISO 13380. Condition monitoring and diagnostics of machines — General guidelines on using performance parameters, 2002.

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION - ISO 13381. Condition monitoring and diagnostics of machines — Prognostics, 2004.

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION - ISO 17359. Condition monitoring and diagnostics of machines — General guidelines, 2003.

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION - ISO 10816\_6. Mechanical vibration — Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts — Part 6: Reciprocating machines with power ratings above 100 Kw

MOBLEY, Keith. An introduction to Predictive Maintenance. Second Edition, 2002

MORA GUTIERREZ, Luis A. Costos de mantenimiento UIS Posgrado en Gerencia de Mantenimiento, Agosto 2009.

MORA GUTIERREZ, Luis A. Mantenimiento estratégico para empresas industriales o de servicios. Editorial AMG, 2008.