ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción

"UTILIZACIÓN DEL SOFTWARE DE MONITOREO DE ANÁLISIS DE VIBRACIONES COMO TÉCNICA PREDICTIVA EN EL SISTEMA DE BOMBEO EN LA INDUSTRIA PAPELERA"

TESIS DE GRADO

Previo a la obtención del Título de:

INGENIERO MECÁNICO

Presentada por:

Christian Eduardo Viteri Miranda

GUAYAQUIL – ECUADOR

AÑO: 2011

AGRADECIMIENTO

Principalmente a Dios y a todas las personas y docentes que colaboraron en la realización de esta TESIS, que aportaron directamente o indirectamente con ideas para la culminación de la misma y en especial al Ing. Ernesto Martínez por su invaluable ayuda como Director de Tesis.

DEDICATORIA

A MI ESPOSA

A MIS PADRES por su apoyo

Incondicional

A MIS HERMANOS

A MI MAMITA PIEDAD

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

Ing. Gustavo Guerrero M.

DECANO DE LA FIMCP
PRESIDENTE

Ing. Ernesto Martínez L.

DIRECTOR DE TESIS

Ing. Eduardo Orcés P.

VOCAL

DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, me corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL"

(Reglamento de Graduación de la ESPOL).

_____

Christian Viteri Miranda

RESUMEN

Papelera Nacional S.A. es una empresa que fue constituida el 28 de Febrero de 1961, la función principal es la de producir papel Kraft (Papel Extensible, Papel Corrugado Medio, Papel Test Liner, Papel Liner, Empaque), su misión es generar bienes y servicios de óptima calidad mediante el racional y eficiente uso de los recursos disponibles, que les permita el mayor nivel de competitividad en procura de la plena satisfacción de los clientes, colaboradores y accionistas de la Empresa; contribuyendo al desarrollo técnico, económico y social del Ecuador, la cual se comprometen con la protección del ambiente natural.

La empresa con el propósito de mejorar la operación de los equipos viene realizando estudios para mejorar la implementación del sistema de vibración que permita tener una mayor disponibilidad y confiabilidad de dichos equipos; es por eso que desde el 07 de Agosto del 2003 se implementa el nuevo sistema de Mantenimiento Predictivo.

Este sistema se compone de un Colector que recepta los datos tomados en el campo y de un Software que procesa los datos a través de espectros de vibración, con el fin de mejorar el análisis de vibración y llevar un control mas

exacto en los equipos ya que anteriormente se hacía la evaluación con otro equipo de vibración que no proporcionaba la suficiente exactitud a los diferentes parámetros de análisis.

El sistema de vibración hacía el análisis de forma global es decir no puntualizaba la causa del daño en los diferentes equipos y principalmente en las bombas y no permitía tomar decisiones para evaluar que tipo de problema estaba presente en el equipo y poder realizar algún método predictivo, que permitan eliminar la causa o corregir las fallas.

El objetivo principal de esta tesis de grado es de verificar y determinar las mejoras obtenidas con la aplicación del nuevo sistema de vibración desde su implementación en uno de los sistemas principales de la producción esto es en el sistema de bombeo de una empresa papelera y verificar que se están cumpliendo los requerimientos y necesidades de la empresa.
Además, en el trabajo de la tesis se hizo un análisis cuantitativo del aumento en la producción de papel desde su implementación, debido a la disminución de los tiempos que se dedica a la reparación de las máquinas del Sistema de Bombeo.

La responsabilidad y funciones que cumplía en la empresa fue la de realizar el control de los equipos del sistema de bombeo mediante la toma de datos a través del colector, y el software de vibración que permitía diagnosticar los fallos que se presentaban en los equipos.

Con los conocimientos adquiridos en la ESPOL y la experiencia obtenida en la práctica, utilizando manuales e Internet se realizó la evaluación del sistema de mantenimiento predictivo comparando lo ocurrido después de la implementación del nuevo sistema de vibración versus lo que ocurría anteriormente, mediante este análisis se determinó las mejoras obtenidas y con esto se evaluó ciertos indicadores que ayudaron a conseguir resultados que lleven a mejorar el proceso y la producción de papel.

Como resultado de la tesis se establecieron nuevos indicadores que permitieron que los equipos a más de mejorar su vida útil incrementen la disponibilidad de los mismos y disminuya los tiempos de intervención.

ÍNDICE GENERAL

Pág.

RESUMEN…….. II

ÍNDICE GENERAL……..... III

ABREVIATURAS……..... IV

SIMBOLOGÍA…….. V

ÍNDICE DE FIGURAS……..…..... VI

ÍNDICE DE TABLAS……. VII

ANTECEDENTES…….. 1

CAPÍTULO 1

1. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA……... 3

1.1 Organigrama de la Empresa…….. 5

1.2 Recepción de Materia Prima…….. 6

1.3 Proceso de producción del papel……..…….. 8

1.4 Producto Terminado…… 21

CAPÍTULO 2

2. ORGANIZACIÓN DEL DEPARTAMENTO DE MANTENIMIENTO…….. 30

2.1 Estructuración de un Departamento de Mantenimiento Predictivo.. 31

2.2 Objetivos del Departamento……... 33

2.3 Funciones del personal encargado del departamento……... 35

2.4 Presupuestos……..……..... 37

CAPÍTULO 3

3. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE MANTENIMIENTO UTILIZADO DESDE EL 2003……. 38

3.1 Técnicas predictivas aplicadas a máquinas rotativas…….. 39

3.2 Descripción del mantenimiento predictivo y sus diferentes métodos 41

3.3 Ventajas del uso del mantenimiento predictivo con respecto a los métodos tradicionales……... 57

3.4 Instrumentación utilizada…….. 60

3.4.1 Descripción del Software de Vibración…… 60

3.4.2 Breve descripción del colector utilizado en la toma de vibración……... 62

3.4.3 Definición de parámetros a monitorear, rangos de medición, puntos de toma y establecimientos de criterios de aceptabilidad…… 66

3.4.4 Configuración de alarmas de nivel y de tendencia……. 82

3.5 Metodología para el análisis y diagnóstico de vibraciones……. 88

3.5.1 Normativas aplicables…… 94

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS OBTENIDOS POR APLICACIÓN DEL SISTEMA SELECCIONADO EN BOMBAS……. 100

4.1 Mejora en el proceso de producción del papel por efectos del análisis de vibración……. 100

4.2 Análisis de falla de las bombas y paradas no programadas…….. 104

4.3 Incremento de la disponibilidad de operación en el Sistema de Bombeo…… 127

4.4 Evaluación y estudio de los tiempos improductivos de mantenimiento predictivo en bombas debido a la vibraciones mecánicas……... 130

4.5 Evaluación de la severidad vibratoria en el Sistema de Bombeo…. 134

CAPÍTULO 5

5. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS……... 147

5.1 Análisis de los tiempos improductivos por fallas imprevistas en el Sistema de Bombeo…… 147

5.2 Análisis estadístico de las ocurrencias de los distintos problemas generados por la vibración en el Sistema de Bombeo…… 151

5.3 Ahorro económico por el sistema implementado……. 156

5.4 Evaluación del incremento en la disponibilidad en el Sistema de Bombeo…… 159

5.5 Análisis cuantitativo para la evaluación de criticidad en el Sistema de Bombeo…….. 165

CAPÍTULO 6

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES…… 179

APÉNDICES

BIBLIOGRAFÍA

ABREVIATURAS

gr/m2	Gramos sobre metros cuadrados
TM	Toneladas métricas
TM/año	Toneladas métricas sobre año
TM/dia	Toneladas métricas sobre día
ISO	Internacional System Organization
PH	Potencial de Hidrógeno
Lbs/h	Libras sobre hora
m/h	Metros sobre hora
uCF	Micro faradio
in /s	Pulgadas sobre segundo
DKL	Double Kraft Liner
OCC	Old Corrugated Container
cm	Centímetros
mm	Milímetros
µm	Micrómetro
SI	Sistema Internacional

Hz	Hertz o Hercios
Gr/m	Gramos sobre metros
m	Metros
Kg/Ton	Kilogramos sobre Toneladas
CPM	Ciclos por minuto
RPS	Revoluciones por segundo
RPM	Revoluciones por minuto
1X	Frecuencia de giro del Rotor
1X RPS	Excitación del pico de la Velocidad
½ X, 1/3X	Armónicos fraccionarios
BPF	Frecuencia de paso de aspas
BFP	Número de Aspas por la Frecuencia
BPFI	Armónicos frecuencia pista interna
BPFO	Armónicos frecuencia pista externa
BFS	Armónicos frecuencia elementos Rodantes
FTF	Armónicos frecuencia de Jaula
SKF	Suenka Kullanguer Fabriken
KW	Kilo Watts
Khz	Kilo Hertz
HP	Horsepower
FMEA	Análisis de los modos y efectos de falla
FMECA	Análisis de modos de fallas y efectos críticos

AAF	Análisis por árboles de fallas
RTA	Radial, Tangencial, Axial
RAT	Radial, Axial, Tangencial
RMS	Raíz media cuadrada

SIMBOLOGÍAS

%	Porcentaje
$	Dólar

ÍNDICE DE FIGURAS

		Pag.
Figura 1.1	Símbolo de la Empresa……..	4
Figura 1.2	Productos de papel…….	4
Figura 1.3	Materia prima utilizada……	6
Figura 1.4	Molino 1…….	8
Figura 1.5	Molino 2…….	8
Figura 1.6	Máquina de papel……	9
Figura 1.7	Transportador de recursos fibrosos……..	10
Figura 1.8	Disgregación de agua reciclada……	10
Figura 1.9	Limpiadores Uniflow y Posiflow…….	11
Figura 1.10	Formación de la hoja……..	12
Figura 1.11	Secadores del Papel……...	12
Figura 1.12	Rebobinadora de Papel……..	13
Figura 1.13	Diagrama de la producción del papel de Molino 1….	13
Figura 1.14	Máquina de papel del Molino 2……	17
Figura 1.15	Diagrama de la producción del papel de Molino 2….	20
Figura 1.16	Papel Test-Liner……	21
Figura 1.17	Papel Corrugado medio……	23

Figura 1.18	Papel Extensible……..	25
Figura 1.19	Sacos de gran contenido elaborados de Papel Extensible…….	27
Figura 1.20	Tubo para envolver el papel……	28
Figura 2.1	Organigrama del Departamento de Mantenimiento	32
Figura 3.1	Ciclo de vida del cojinete……	40
Figura 3.2	Registro de vibraciones en un ciclo de trabajo de la pala…….	43
Figura 3.3	Transformada Tiempo-Frecuencia…….	44
Figura 3.4	Bomba de extracción……	47
Figura 3.5	Frecuencia de Ultrasonido……	49
Figura 3.6	Representación gráfica del árbol de falla…….	54
Figura 3.7	Espectros de vibración en el Software…….	61
Figura 3.8	Asignación de un rodamiento SKF 6313…….	62
Figura 3.9	El Colector (Microlog CMX450)……..	63
Figura 3.10	Estructura de datos de los puntos de prueba……	68
Figura 3.11	Configuración de medición en el punto 1V VEL…..	69
Figura 3.12	Configuración del punto de prueba con respecto a la asignación del Rodamiento…….	70
Figura 3.13	Configuración de 3 bandas en los puntos 1x,2x y 2FL…….	71
Figura 3.14	Medición Vertical en Velocidad (mm/seg)…….	72
Figura 3.15	Medición Horizontal en Velocidad (mm/seg)……	73
Figura 3.16	Medición Horizontal en Aceleración Envolvente (GE)……	73

Figura 3.17	Medición Axial en Velocidad (mm/seg)…….	74
Figura 3.18	Señal de Vibración…….	77
Figura 3.19	Ubicaciones de Acelerómetros……..	78
Figura 3.20	Alineación de ejes de vibración……..	80
Figura 3.21	Ejes de medición……..	81
Figura 3.22	Tendencia de un soplador……	88
Figura 4.1	Producción de papel del Molino 1…….	102
Figura 4.2	Producción de papel del Molino 2…….	103
Figura 4.3	Producción de papel del Molino 1 y Molino 2……	104
Figura 4.4	Rodamiento lado impulsor……..	110
Figura 4.5	Pista exterior del rodamiento lado acople…….	111
Figura 4.6	Pista interior del rodamiento lado acople…….	112
Figura 4.7	Pista interior curvada del rodamiento……	112
Figura 4.8	Elementos rodantes y canastilla del rodamiento 7222..	113
Figura 4.9	Desbalanceo Estático……..	115
Figura 4.10	Desbalanceo Dinámico……..	116
Figura 4.11	Desbalanceo en rotor colgante……	117
Figura 4.12	Desalineamiento Angular…….	117
Figura 4.13	Desalineamiento Paralelo……	118
Figura 4.14	Desalineamiento entre chumaceras…….	119
Figura 4.15	Holgura Eje - Agujero……	120
Figura 4.16	Soltura Estructural…….	121
Figura 4.17	Frecuencia de aspas ……	122
Figura 4.18	Cavitación……..	123
Figura 4.19	Falla en pista interna de Rodamientos……..	123
Figura 4.20	Falla en pista externa de Rodamientos……..	124
Figura 4.21	Falla en elementos rodantes……	125
Figura 4.22	Deterioro de la Jaula de Rodamientos……..	126
Figura 4.23	Disponibilidad anual en el Sistema de Bombeo…..	128

Figura 4.24	Tiempos Improductivos desde el 2001 hasta el 2009……	131
Figura 4.25	Pareto de paradas NO Planificadas…….	133
Figura 5.1	Tiempos Improductivos desde el 2001 hasta 2009.	148
Figura 5.2	Causa de paradas NO Programadas…….	150
Figura 5.3	Análisis Estadístico de los problemas ocurridos en el Sistema de Bombeo……..	154
Figura 5.4	Disponibilidad anual en el Sistema de Bombeo…..	165
Figura 5.5	Modelo de Matriz de Riesgo…….	175
Figura 5.6	Ejemplo de Matriz de Riesgo……	177

ÍNDICE DE TABLAS

		Pag.
Tabla 1	Especificaciones Técnicas del papel Test Liner……..	23
Tabla 2	Especificaciones Técnicas del papel Corrugado Medio……..	25
Tabla 3	Especificaciones Técnicas del papel Extensible……..	27
Tabla 4	Símbolos utilizados para la representación del árbol de falla……	55
Tabla 5	Rangos de severidad de vibración para máquinas pequeñas…...	84
Tabla 6	Grupo 3: Bombas con impulsores multipaletas y propulsores separados con potencias superiores a 15 Kw……..	95
Tabla 7	Grupo 4: Bombas con impulsores multipaletas y propulsores integrados con potencias superiores a 15 Kw…….	96
Tabla 8	Valores en mm/s RMS……..	98
Tabla 9	Síntomas y causas de fallas hidráulicas y mecánicas en las bombas……	106
Tabla 10	Disponibilidad anual en cada proceso……	129
Tabla 11	Clasificación de las zonas de severidad vibratoria para máquinas del Grupo 1……..	141

Tabla 12	Clasificación de las zonas de severidad vibratoria para máquinas del Grupo 2……..	142
Tabla 13	Clasificación de las zonas de severidad vibratoria para máquinas del Grupo 3……..	143
Tabla 14	Clasificación de las zonas de severidad vibratoria para máquinas del Grupo 4……..	144
Tabla 15	Frecuencia de causas probables de falla en el Sistema de Bombeo……..	152
Tabla 16	Diferencia entre Desbalanceo y Desalineamiento……..	153
Tabla 17	Frecuencia de causas probables de falla en el Sistema de Bombeo……..	155
Tabla 18	Criterios de criticidad y su cuantificación……..	167
Tabla 19	Ejemplo de frecuencia de fallas en Bombas…….	168
Tabla 20	Ejemplo de impacto operacional en Bombas…….	170
Tabla 21	Ejemplo de flexibilidad operacional en Bombas……...	171
Tabla 22	Ejemplo de costos de mantenimiento en Bombas……...	172
Tabla 23	Ejemplo de impacto S.A.H en Bombas…….	173
Tabla 24	Ejemplo de cálculo de criticidad en bombas……	176
Tabla 25	Ejemplo de cálculo de criticidad total en bombas……...	177

ANTECEDENTES

El presente trabajo trata de la Utilización del Software de Medición de Análisis de Vibración en una empresa papelera. En Ecuador contamos con varias papeleras pero para nuestro estudio se escogió una planta de papel que se ha ganado un reconocido prestigio Nacional e Internacional en cuanto a la calidad de sus equipos, a la ingeniería aplicada y a la constante innovación.

Esta empresa es “PAPELERA NACIONAL S.A.” la cual emplea para la producción de papel dos máquinas que son Molino 1 y Molino 2. Molino 1 produce aproximadamente 100 TM diarias en los tipos de papel que son Test Liner, Corrugado Medio, Extensible y empaque. Molino 2 produce aproximadamente 160 TM diarias en los tipos de papel que son Test Liner y Corrugado Medio.

La materia prima utilizada para la producción de estos tipos de papel en forma general es el DKL (Double Kraft Liner) la cual es una materia prima importada que contiene recortes de planchas de cartones, OCC (Old Corrugated Container) es una materia prima importada que contiene cajas de cartón, Pulpa de Madera que es una materia prima importada, Materia prima a nivel nacional como son periódicos, caja de cartón, etc.; se la ha denominado AAA o triple A.

En este estudio se emplea la técnica predictiva del Análisis de Vibración en el Sistema de Bombeo en una empresa papelera, la cual tiene como alcance el resultado de disminuir los tiempos perdidos por fallas en el Sistema de Bombeo, lo que hace que aumente la producción de Papel. Estos resultados se darán al establecer los parámetros que permitan que los equipos a más de mejorar su vida útil incrementen la disponibilidad de los mismos.

CAPÍTULO 1

1. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA

PAPELERA NACIONAL S.A., fue fundada en el año 1961. Inicia sus operaciones en el año 1968, bajo la dirección de Internacional Paper Co., con una capacidad instalada de producción de 10000 TM/año, de papel de peso básico bajo (60 gr/m^2). Planeada inicialmente para consumir bagazo de caña, rechazo generado del proceso industrial del Ingenio Azucarero San Carlos, para lo cual se dispone en Papelera una Planta de Pulpa de Bagazo de 60 TM/día de capacidad. Actualmente no está en operación para evitar la contaminación del Medio Ambiente exigido por las Normas ISO 14000.

Esta planta industrial ha sido ampliada en varias ocasiones hasta llegar al período de realización del proyecto (1998 a 2001), con una capacidad de producción de 75000 TM/año. Compuesto de la siguiente manera: 25.000

TM/año en el molino 1, y 50.000 TM/año en el molino 2 y en la actualidad (2010) 100.000 TM/ año en el molino 1 y 300.000 TM/año en el molino2.

Papelera Nacional S.A. cuenta en sus instalaciones con una planta de conversión de papel, donde se fabrican sacos de papel para las industrias cementera y azucarera.

Para su operación Papelera Nacional también cuenta con una planta de fuerza con tres calderas que dan una capacidad instalada de 135,000 lbs/hr de vapor y un turbo-generador Eliot de 4,0 Mwatts de capacidad en mismo que esta Stand by con el Sistema Nacional Interconectado.

Fuente: Papelera Nacional S.A.

Fuente: Papelera Nacional S.A.

Figura 1.1 Símbolo de la Empresa **Figura 1.2 Productos de Papel**

1.1 Organigrama de la Empresa

Papelera Nacional S.A. esta dividida en cinco órganos administrativos principales que dirigen las funciones. Aunque la Gerencia General es la encargada de supervisar los otros cuatro órganos Administrativos que se muestran a continuación y son la columna vertebral de la Empresa:

- División Administrativa
- División Financiera
- División Comercial
- División de Desarrollo Industrial

La División Administrativa consta o está formada por tres sub-órganos que se encargan de llevar adelante la labor asignada por la empresa y son los siguientes: Recursos Humanos, Bodegas, Adquisiciones y SS.GG.

La División Financiera tiene a cargo el departamento de Contabilidad, Tesorería y Sistemas.

La División Comercial esta conformada por el departamento de Ventas y Bodega de productos terminados.

Por último tenemos la División de Desarrollo Industrial que tiene a su vez dos sub-órganos que son el Área de Producción y el Área Técnica mostrados en el **Apéndice A.**

1.2 Recepción de Materia Prima

El propósito inicial de esta industria, es seleccionar y analizar, mediante controles de calidad, las materias primas a utilizar como se muestra en la figura 1.3, pudiendo así garantizar el éxito de los procesos siguientes:

Figura 1.3 Materia Prima Utilizada

DKL-13 (DOUBLE KRAFT LINER): Son recortes corrugados embalados conteniendo liners, provenientes de las fábricas cartoneras, ya sean kraft Liner, de yute o Test Liner. En esta calidad no son aceptables los adhesivos no solubles, rollos desbastados o triturados médium y tratados médium o de liner.

- El total de impurezas no puede exceder del 2%
- Humedad máxima permitida: 10%

DOUBLE SORTED CORRUGATED-12.- Consiste en recortes corrugados doblemente seleccionados, provenientes de supermercados y/o de alguna otra fuente comercial o industrial, conteniendo liners, test liner, yute o kraft. Este material ha sido especialmente seleccionado para estar libres de cajas de cereales, caja de zapatos, cartones de leche, plásticos y cera.

- Materiales prohibitivos: ½ de 1%
- El material de impurezas no puede exceder del 2%

OCC-11 (OLD CORRUGATED CONTAINER).- Son recortes de caja de cartón corrugado que contiene liners, ya sea test liner, yute o kraft liner.

- Materiales prohibitivos: no pueden exceder el 1%
- El total de impurezas no puede exceder del 5%
- Humedad máxima permitida: 12%

PULPA DE MADERA (PULPA KRAFT).- Material fibroso, generalmente derivado de la madera, que es producido por un proceso donde el ingrediente activo es una mezcla de hidróxido de sodio y sulfuro de

sodio. “Kraft” es comúnmente utilizado como “sulfato” y se deriva de la palabra alemana “fuerte”, precisamente por la resistencia de las fibras que resultan de este proceso de pulpeo.

Humedad máxima permitida: 10%

1.3 Proceso de Producción del Papel

La empresa posee para la producción del papel dos molinos que son: Molino 1 y Molino 2.

La preparación de pasta se realiza a través de los hydrapulper que son los encargados de desintegrar la materia prima la cual se puede observar en las figuras 1.4 y 1.5 que pertenecen a los molinos 1 y 2 respectivamente.

Fuente: Papelera Nacional S.A.

Figura 1.4 Molino 1

Fuente: Papelera Nacional S.A.

Figura 1.5 Molino 2

Molino de papel Uno

La capacidad inicial (1968) de este molino era de 10000 TM/Año y a partir de 1985 se realizaron importantes inversiones aumentando la capacidad a 30000 TM/Año en el 2007, agregándose una Unidad Clupack para la fabricación de papel Extensible, que es donde se utiliza la pulpa de madera.

Es en su totalidad marca SULZER ESCHER WYSS, de procedencia ALEMANA.

El ancho útil de máquina es de 230 cm (90.6 pulgadas)

La velocidad máxima de operación es de 350 metros por minuto.

El rango de peso básico es de 60 a 175 gr/m

Fuente: Papelera Nacional S.A.

Figura 1.6 Máquina de Papel

En este molino que se muestra en la figura 1.6 produce los siguientes tipos de papel:

1. Test Liner
2. Corrugado Medio
3. Extensible

Para la fabricación de papel se requiere inicialmente pulpear los recursos fibrosos (proceso de desintegración o disgregación de los materiales fibrosos utilizados en agua fresca o agua recuperada del sistema). Es lo que se hace con los desperdicios de cartón reciclados o pulpas celulósicas en láminas o rollos. La figura 1.7 muestra los recursos fibrosos y la figura 1.8 muestra la disgregación usando agua reciclada o fresca.

Fuente: Papelera Nacional S.A.

Figura 1.7 Transportador de Recursos Fibrosos

Fuente: Papelera Nacional S.A.

Figura 1.8 Disgregación de Agua Reciclada

Una vez pulpeados los materiales fibrosos, estos deben ser sometidos a procesos de limpieza y depuración para eliminar los contaminantes acompañantes como son: plásticos, metales, arena, vidrio, etc.

Lo indicado se realiza en la planta de preparación de pasta, la que cuenta con limpiadores centrífugos de alta densidad, limpiadores centrífugos de baja densidad (tipos Uniflow y Posiflow) y cribas presurizadas. Dentro de esta planta a las fibras se les da el tratamiento mecánico mediante equipos especiales conocidos con el nombre de refinadores, tratamiento que tiene mucho que ver con la resistencia del papel que se está produciendo. La figura 1.9 muestra los limpiadores Uniflow y Posiflow.

Fuente: Papelera Nacional S.A

Figura 1.9 Limpiadores Uniflow y Posiflow

De la preparación de pasta, la pulpa pasa a la máquina de papel, lugar donde se alimenta la pasta al Fourdriner de la máquina desde un cajón de presión. Es en el Fourdriner donde se forma la hoja de papel, eliminándose la mayor cantidad posible el agua que acompaña a las fibras por gravedad y vacío. Una vez formada la hoja esta pasa a las prensas para continuar eliminando humedad, para posteriormente pasar a los secadores hasta alcanzar la humedad del 7% con que el papel es comercializado. La figura 1.10 muestra la máquina de papel donde se forma la hoja y la figura 1.11 muestra los secadores donde pasa la hoja de papel para eliminar la humedad.

Fuente: Papelera Nacional S.A.

Figura 1.10 Formación de la Hoja

Fuente: Papelera Nacional S.A.

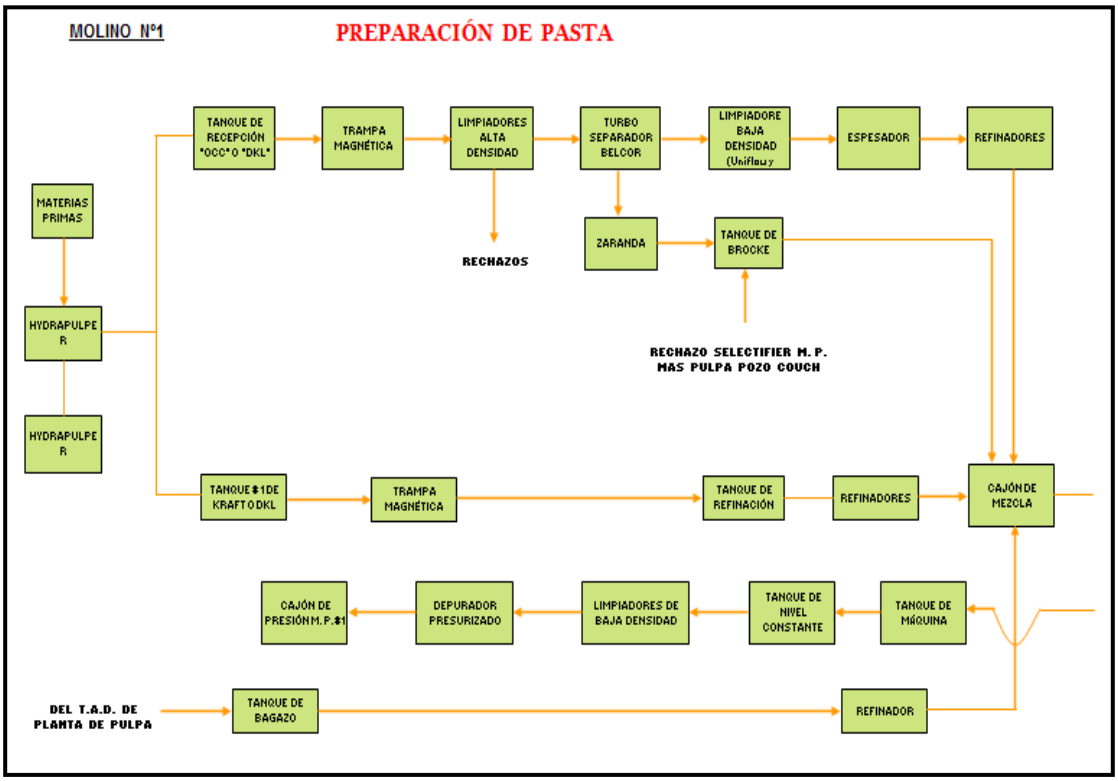
Figura 1.11 Secadores del Papel

El acabado final del papel se lo da en la rebobinadora, que es donde se da el ancho y el diámetro al rollo de papel de acuerdo al requerimiento

del cliente. La figura 1.12 nos muestra el producto terminado a través de la rebobinadora.

Figura 1.12 Rebobinadora de Papel

Figura 1.13 Diagrama de la producción del Papel Molino 1



Fuente: Papelera Nacional S.A.

Los químicos utilizados en el molino 1 son los siguientes:

Sulfato de Aluminio.- Se adiciona al sistema en el Silo de la Máquina, se utiliza para precipitar la resina encolante llamada ABIESCAN, con un Ph de 4,8 – 5,2 tanto para Corrugado Medio como para Extensible y Test Liner. Con el Sulfato de Aluminio se logra encolar el papel con un rango de Cobb de 20 – 30 para extensible y de 30 – 60 para Corrugado Medio y Test Liner.

La dosificación está en 20 Kg/Ton de papel para Extensible, 23 Kg/Ton de papel para Corrugado Medio y 27 Kg/Ton de papel para Test Liner.

Resina Encolante.- Llamado ABIESCAN-E, reacciona con la fibra celulosa, en presencia de sulfato de Aluminio a un Ph de 4,8 – 5,2

La dosificación está en 0.50 Kg / Ton de papel para Extensible, 0,30 Kg / Ton de papel para Corrugado Medio y 0.60 Kg / Ton de papel para Test Liner. Se adiciona en la Bomba de succión del Tanque de Mezcla.

Resina resistente en húmedo.- Esta resina se llama POLÍMERO 216, se adiciona en Tanque primario de Máquina. La dosificación es 0.50 Kg / Ton de papel para Extensible, 0.30 Kg / Ton de papel para Corrugado

Medio y 0.15 Kg / Ton de papel para Test Liner. Sirve para darle mayor resistencia al papel en cualquier circunstancia.

Bactericida.- Se adiciona en el Tanque Dump Chest. Su dosificación es 0,20 Kg / Ton de papel para Corrugado Medio, 0.20 Kg / Ton de papel para Extensible y 0.15 Kg / Ton de papel para Test Liner.
Sirve para inhibir a la pulpa de bacteria, hongos, levaduras y demás microorganismos patógenos.

Secuestrante (Barredor Polifloc).- Es catiónico y reacciona con la basura aniónica para permitir que el almidón reaccione con las fibras celulositas y obtener así mayor resistencia de las pruebas físicas como cóncora, rigidez, otras.
Su dosificación es 0.52 Kg / Ton de papel para Corrugado Medio, 1 Kg / Ton de papel para Extensible y 0.60 Kg / Ton de papel para Test Liner. Se adiciona en el Tanque de Mezcla.

Almidón Catiónico.- Se llama almidón catiónico WEST LAP A. Se adiciona en la succión de la bomba del Tanque de Máquina. Su dosificación es 5 Kg / Ton de papel para Extensible, 4 Kg / Ton de papel

para Corrugado Medio y 4.5 Kg / Ton de papel para Test Liner. Reacciona con la fibra de celulosa para mejorar la resistencia física del papel en cóncora, rigidez, mullen, rasgado, etc.

Molino de papel Dos

La máquina de papel de este molino, fue adquirida en Mayo de 1992 a la compañía PAPIER FABRIK PALM GMBH de Alemania, la misma que fue fabricada bajo pedido a la Voith GMBH de Alemania en el año de 1965, para la producción de papeles marrón o kraft con la especialización de papel corrugado. En Julio de 1992 se inició desmontaje y embalaje de la máquina, recibiéndose los primeros contenedores en Agosto de 1994.

Para la preparación de pasta se seleccionó a la compañía BELOIT FIBER SYSTEM Inc. de Dalton Mass-USA quienes proveyeron la totalidad de los nuevos equipos, realizaron la ingeniería, la supervisión del montaje, la puesta en marcha y la capacitación a los operarios.

La capacidad teórica instalada del Molino 2 fue de 50000 TM/Año con una producción diaria de 150 TM.

Las pruebas de arranque se efectuaron a partir de los primeros días de marzo de 1994 y se alcanzaron los niveles de productividad diaria para finales del mismo mes.

Los productos de este molino que se muestra en la figura 1.14 son:

1. Test Liner
2. Corrugado Medio

Figura 1.14 Máquina de Papel del Molino 2

Los químicos utilizados en el molino 2 son los siguientes:

Bactericida.- El nombre comercial es BACT-200 el cual se agrega en el tanque de Máquina para controlar las bacterias anaeróbicas y aeróbicas, levaduras y hongos. Se realiza monitoreo de población microbiana la cual tiene como límite máximo para hongos y levaduras. $1x10^5$ uCF/ ml y para bacterias $1x\ 10^7$ uCF/ml. La relación está en 0.15 Kg/TON para Corrugado Medio y 0.15 Kg/TON para Test Liner.

Barredor de basura Aniónica.- Este es un polímero catiónico de bajo peso molecular cuya función es atraer gomas, resinas y todo el material aniónico contaminante para cuando se agregue el almidón este sea utilizado esencialmente por las fibras y no por otras partículas aniónicas. El barredor se agrega en el Cajón de Mezcla. Actualmente se agrega el barredor llamado LIPESA 1544.

La relación está en 0.88 Kg/ TON

Almidón Catiónico.- Se dosifica directamente a la pasta para mejorar la resistencia física del papel (cóncora, rigidez, Mullen, CFC).

La relación Almidón-Papel esta entre 7 - 9 Kg/TON de papel. El almidón se adiciona luego de la Bomba de Máquina.

Resina Encolante.- Se utiliza una resina RAISAFOB 8115E la cual reacciona y precipita con la fibra en un PH neutro (6.8 – 7.2).

La dosificación en Corrugado Medio es de 8 Kg/Ton y en Test Liner es de 6 Kg/Ton. Esta resina sirve para lograr un encolado interno en el papel, valor que se obtiene en una prueba llamada “Prueba de COBB”, con un rango de 30 – 40 gr/m2.

Dispersante.- Este se usa tanto para limpieza de la pasta como para limpieza de las vestiduras.

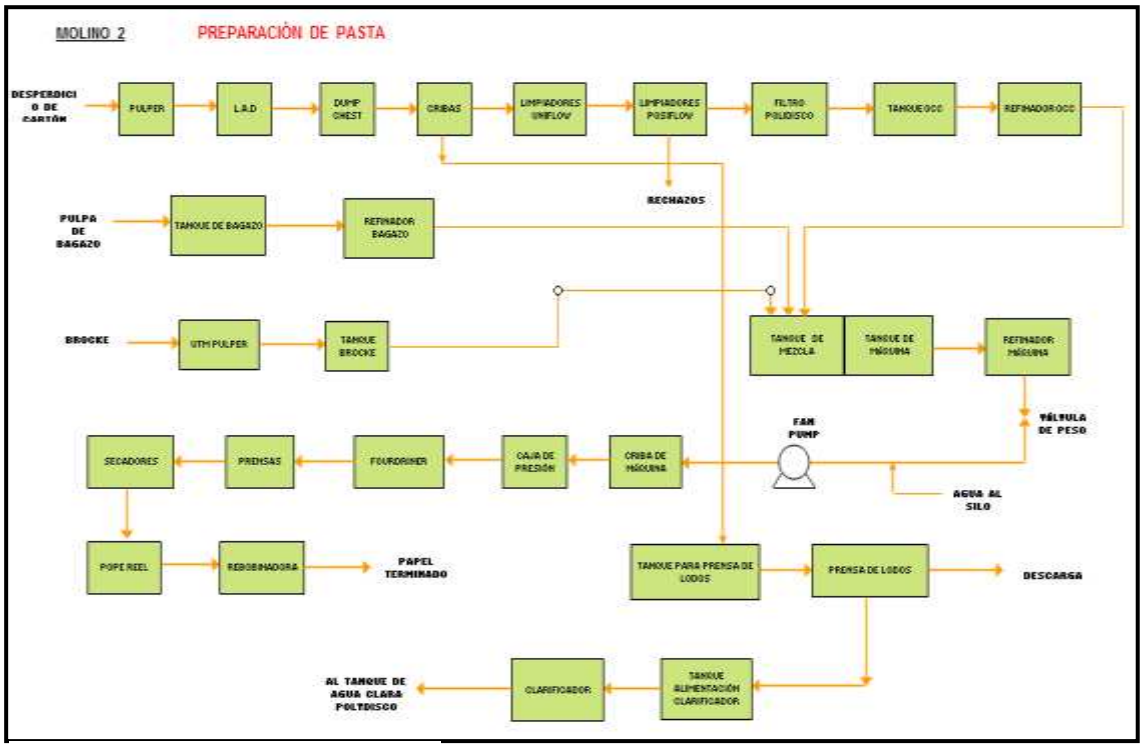
En la limpieza de la pasta se usa BUSPERSE-47 y en la limpieza de las vestiduras (tela) se usa CLEAN 2582. La dosificación es 0,20 Kg/ Ton de papel.

Resina de resistencia en húmedo.- Se usa una resina EPICLORHIDRINA en PH neutro alcalino. El nombre comercial es DISPRO 323. La dosificación es 2.5 Kg/ Ton de papel. Este se usa tanto

en Corrugado Medio como en Test Liner, de acuerdo a las exigencias de los clientes.

Sulfato de Aluminio.- Se usa como puente de unión entre la fibra celulosa y la resina encolante (ABIESCAN), con un Ph entre 4.8 y 5.2. Actualmente la resina encolante (RAISAFOB 8115E) reacciona con la fibra celulosa en un Ph entre 6,8 y 7,2 por lo tanto el Sulfato de Aluminio no es necesario.

Figura 1.15 Diagrama de la producción del Papel Molino 2



Fuente: Papelera Nacional S.A.

1.4 Producto Terminado

Test Liner.- Es un papel tipo Kraft sin blanquear fabricado con materias primas recicladas como recortes de caja de cartón. Este papel encolado, basado en resinas naturales para evitar que adquiera humedad, tiene especificaciones acordadas junto con los clientes, en pesos básicos desde 120 hasta 270 g/m^2.

Las cajas de cartón fabricadas con este producto adquieren propiedades estructurales a menor valor, por lo que se constituyen en cajas auto soportantes y de uso de protección interna del contenido embalado, tal como las caras exteriores e interiores de la caja de banano, la cual se muestra en la figura 1.16.

Figura 1.16 Papel Test- Liner

TABLA 1

Especificaciones Técnicas del papel Test Liner

Peso Básico	Estándar	170	205	230	240	260
Tappi T410 (g/m^2)	Mínimo	165	200	223	235	254
	Máximo	175	240	237	245	266
		170	205	230	240	260
Humedad	Estándar	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5
Tappi T412 (%)	Mínimo	6,9	6,7	6,9	6,9	6,9
	Máximo	8,1	8,3	8,1	8,1	8,1
		170	205	230	240	260
Rigidez CD	Estándar	30	40	43	46,2	50
Tappi T818 (Kg)	Mínimo	25,5	36	39	43	46
		170	205	230	240	260
Mullen	Estándar	68	75	80	82	86
Tappi T403 (Psi)	Mínimo	61	68	73	75	81
		170	205	230	240	260
Cobb (120seg)	Estándar	40	40	40	40	40
Tappi T441 (g/m^2)	Mínimo	20	20	20	20	20

Fuente: Papelera Nacional S.A.

Corrugado Medio.- Es un papel fabricado con materias primas recicladas y fibra vírgenes provenientes de la pulpa de bagazo de caña de azúcar, de acuerdo a las especificaciones técnicas acordadas mutuamente con sus clientes, en pesos básicos desde 127 hasta 129 g/m^2, la cual se muestra en la figura 1.17

Las cajas de cartón fabricadas con este producto ofrecen mayor resistencia al aplastamiento y apilamiento. Parte intermedia de las capas del Test Liner.

Para embalaje de banano, jabón, flores, frutas, botellas de artículos de vidrio, etc.

Figura 1.17 Papel Corrugado Medio

TABLA 2

Especificaciones Técnicas del papel Corrugado Medio

Peso Básico	Estándar	127	146	160	176	195
Tappi T410 (g/m^2)	Mínimo	124	143	157	171	190
	Máximo	130	150	165	180	200
		127	146	160	176	195
Humedad	Estándar	7,5	7	7,5	7,5	7,5
Tappi T412 (%)	Mínimo	6	6,9	6,9	6,9	6,9
	Máximo	9	7,1	8,1	8,1	8,1
		127	146	160	176	195
Rigidez CD	Estándar	18	25,5	29,5	34,5	40
Tappi T818 (Kg)	Mínimo	17,7	22,7	26,8	31,4	36,4
		127	146	160	176	195
Cóncora (CMT)	Estándar	29,1	38	39	41	43
Tappi T809 (Kg)	Mínimo	26,4	34	38	38	40
		127	146	160	176	195
CFC-O(CCT)	Estándar	33	39,5	43,6	47,2	52,7
Tappi T824 (Kg)	Mínimo	31,8	36,8	40,4	44,1	49,1
		127	146	160	176	195
Calibre	Estándar	0,22	0,26	28	0,31	0,34
	Mínimo	0,17	0,20	22	0,24	0,27
	Máximo	0,26	0,31	34	0,37	0,41
		127	146	160	176	195
Cobb (120seg)	Estándar	40	40	40	40	40
Tappi T824 (Kg)	Mínimo					

Fuente: Papelera Nacional S.A.

Extensible.- El papel extensible o semiclupack es un papel de alta resistencia o como su nombre lo indica tiene la capacidad de extenderse para absorber la energía producida al impacto, la cual se muestra en la figura 1.18 utilizado en la fabricación de sacos multicapas de gran contenido. Es fabricado con pulpa kraft sin blanquear de fibra larga y desperdicios de cartón DKL-13. Sus especificaciones son acordadas junto con los clientes, en pesos básicos desde 100 hasta 110 g/m^2.

Sacos multicapas confeccionadas con papel extensible clupack. Son de alta resistencia física, de fondo pegado y boca abierta o con válvula. Su capa interior es impresa a dos colores y el número de capas depende del producto a envasar.

Figura 1.18 Papel Extensible

TABLA 3

Especificaciones Técnicas del papel Extensible

Peso Básico	Estándar	100	105	110
Tappi T410 (g/m^2)	Mínimo	98	103	108
	Máximo	102	107	112
		100	105	110
Humedad	Estándar	7	7	7
Tappi T412 (%)	Mínimo	6	6	6
	Máximo	8	8	8
		100	105	110
Rasgado L	Mínimo	1000	1080	1110
Tappi T818 (Kg)				
		100	105	110
Rasgado T	Mínimo	1250	1320	1400
Tappi T809 (Kg)				
		100	105	110
TEA L	Estándar	240	255	255
Tappi T824 (Kg)	Mínimo	220	230	230
		100	105	110
TEA T	Estándar	150	170	170
	Mínimo	140	160,00	160
		127	146	160
Cobb (60seg)	Estándar	25	25	25
Tappi T824 (Kg)	Máximo	30	30	30

Fuente: Papelera Nacional S.A.

Sacos de gran contenido en Papel Extensible

Son confeccionados con dos o más capas, valvulados, boca abierta, con fondos pegados y en diferentes tamaños de acuerdo a los requerimientos del cliente y del producto la cual se muestra en la figura 1.19. Pueden estar impresos con dos colores en la cara interior para poner la información del producto y del fabricante.

Son envases para gran contenido o para productos en polvo o granulados son confeccionados con papel extensible.

Fuente: Papelera Nacional S.A.

Figura 1.19 Sacos de gran contenido elaborados de Papel Extensible

Especificaciones Técnicas de Sacos de Gran Contenido del Papel Extensible

SACOS PARA	CEMENTO	AZUCAR
Papel	EXT 105	EXT 105
Tipo	Fondo sellado con válvula	Fondo sellado con boca abierta
# capas	2	3
# colores	2	2
largo (mm)	630	810
ancho (mm)	520	570
fondo (mm)	105	105
Válvula (mm)	105	n/a

Tubos Espiralados

Fabricados con ribetes de papel kraft de ocho centímetros de ancho, con las especificaciones técnicas acordadas en conjunto con nuestros clientes, la cual se muestra en la figura 1.20, con pesos básicos desde 146 hasta 270 g/m^2, diámetros desde 3.81 hasta 10.2 cm (1.5 a 4 pulgadas), y espesor desde 0.04 hasta 0.10cm.

Estos tubos son usados como núcleos para envolver papel, plásticos, textiles, etc.

PAPEL: Test Liner 270 g/m^2 (55.33lb/1000pie^2)

CAPACIDAD: 200m/h

Fuente: Papelera Nacional S.A.

Figura 1.20 Tubo para envolver el Papel

Diámetro del tubo: 2” – 3” – 4”

Longitud mínima del tubo: 1 metro

Consiste en el espiralamiento de rollos de papel de aproximadamente 8 cm. de ancho. El número de rollos a utilizar determina la resistencia del tubo.

Utilizados comúnmente en la industria textil, plástica y papel ideal para soportar el peso de los rollos de este material.

CAPÍTULO 2

2. ORGANIZACIÓN DEL DEPARTAMENTO DE MANTENIMIENTO

En la estructuración de una Organización de Mantenimiento hay que tomar en cuenta las condiciones técnicas, geográficas y de disponibilidad del personal calificado. Los conceptos básicos para establecer una buena organización de mantenimiento son:

- Establecimiento de autoridades claras por división.
- Mantener una línea vertical de autoridad y responsabilidad, hasta donde sea posible.
- Mantener el número óptimo de personal, reportando a un supervisor
- Ajustar la organización de acuerdo al personal disponible

Otras condiciones a tomar en cuenta de acuerdo a los problemas locales son:

1. Tipo de operación (civil, mecánica, eléctrica, instrumento).
2. Continuidad requerida en la operación (proceso continuo o proceso por lote)
3. Situación geográfica (planta compacta o equipos dispersos)
4. Tamaño de la planta (Nº de equipos, complejidad)
5. Tamaño del departamento de mantenimiento (política de la gerencia de la organización)
6. Condición de adiestramiento y calidad de la fuerza hombre (requiere de adiestramiento o aumento de supervisión)

2.1 Estructuración de un Departamento de Mantenimiento Predictivo

Para empezar nuestro trabajo primero se debe saber como está compuesto un departamento de mantenimiento predictivo y cuales son sus técnicas.

Primero como se puede ver en la figura 2.1 nos muestra un Organigrama de como está conformado el departamento de

mantenimiento predictivo y sus funciones desde su instalación y en la actualidad donde ya toma el nombre de Departamento de Confiabilidad con su respectivo Presupuesto.

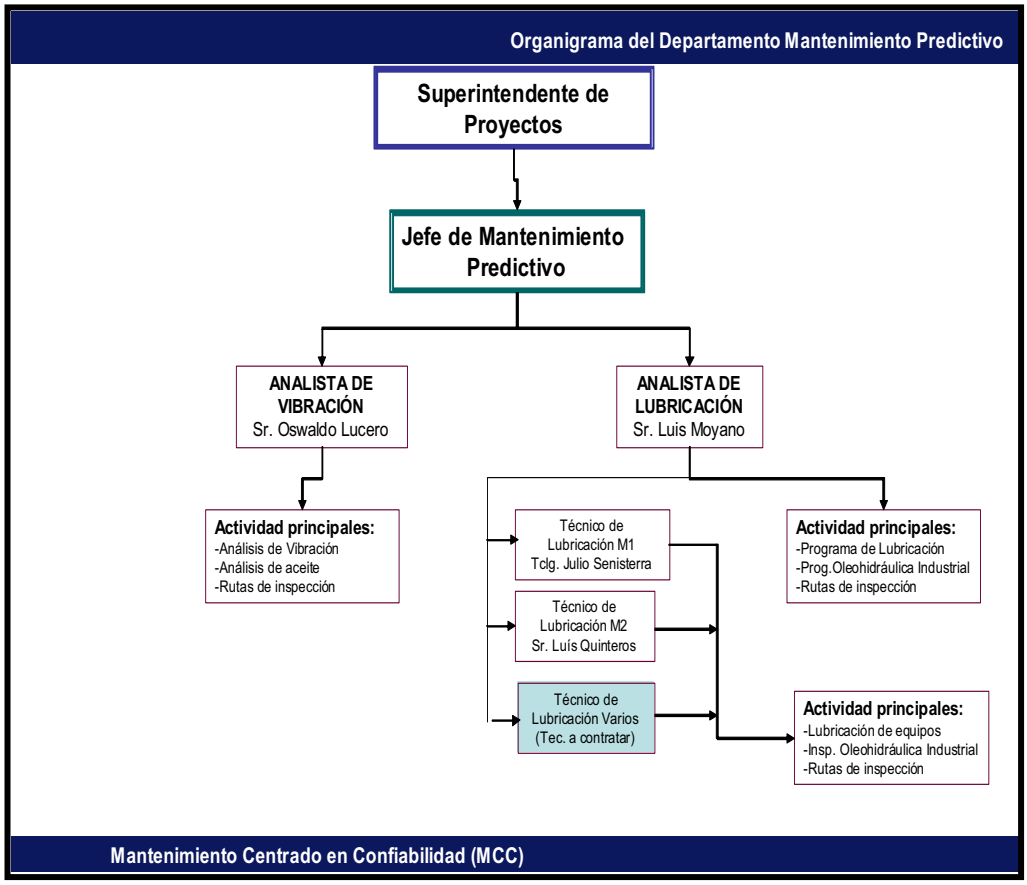


Figura 2.1 Organigrama del Departamento de Mantenimiento

2.2 Objetivos del Departamento

Ejecutar las diferentes actividades de mantenimiento como: prueba, inspección, ajuste, alineación, remoción, reemplazo, reinstalación, detección y análisis de fallas, calibraciones, reparación, modificación, reconstrucción y lubricación, con la optimización de recursos humanos y económicos para mantener las condiciones de servicio establecidas según el diseño de equipos, así como lograr el alcance de la vida útil de los mismos.

Objetivos Generales

- Reducir el número de averías y su duración
- Proporcionar una asistencia técnica, eficaz y rápida a las instalaciones
- Investigar las causas que producen las averías
- Evitar la degradación prematura de los equipos
- Emplear el potencial humano racionalmente
- Conseguir el costo de mantenimiento más bajo posible
- Ejecutar los trabajos con seguridad e higiene personal
- Perfeccionar y especializar profesionalmente al personal

- Gestionar eficazmente los inventarios de stock y de repuestos
- Estudiar y realizar modificaciones, sin grandes inversiones que mejoren algunos de los aspectos citados anteriormente

Existen dos objetivos fundamentales, que al realizar un mantenimiento correcto desembocan en una serie de beneficios.

1. Eliminación de detenciones de producción no necesarias originadas por fallas, deterioros o destrucciones de las máquinas, equipos e instalaciones.

2. Optimización de los costos de mantenimiento, por buenas prácticas para maximizar la productividad.

Los beneficios que se logran al cumplir con los objetivos anteriores son los siguientes:

- Menor pérdida de producción con los siguientes ahorros y cumplimientos de compromisos
- Menor cantidad de repuestos en bodega

- Menor cantidad de equipos de reserva
- Menor necesidad de tiempo extra, ya sea del personal de producción o del personal de mantenimiento
- Menor costo de reparación debido a ajustes menores efectuados oportunamente
- Mejor conservación de los equipos
- Reducción de los costos directos de mantenimiento, de mano de obra y de materiales

2.3 Funciones del personal encargado del Departamento

El departamento de Mantenimiento Predictivo está conformado por el siguiente personal de trabajo:

JEFE DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO

Función básica: Planificar, Organizar y Supervisar al personal a su cargo en el cumplimiento de las actividades del Mantenimiento Predictivo y centrado en la confiabilidad, para garantizar la continuidad de las operaciones en cada una de las Áreas Productivas, a fin de

cumplir con los compromisos de producción acorde a los estándares planificados por la empresa.

ANALISTA DE VIBRACIÓN

Función básica: Organizar, controlar y/o ejecutar las actividades de monitoreo de vibración y análisis de aceite de las máquinas y equipos rotativos de la planta industrial, para garantizar la continuidad de las operaciones en cada una de las Áreas Productivas, a fin de cumplir con los compromisos de producción acorde a los estándares planificados por la empresa.

ANALISTA DE LUBRICACIÓN

Función básica: Organizar, controlar y/o ejecutar las actividades de lubricación e hidráulica de las máquinas, equipos o herramientas de la planta industrial, para garantizar la continuidad de las operaciones en cada una de las Áreas Productivas, a fin de cumplir con los compromisos de producción acorde a los estándares planificados por la empresa.

TÉCNICO DE LUBRICANTE

Función básica: Evaluar los equipos de planta en el equipo definido para el fin, seguir programa de trabajo y mantener actualizado el programa de lubricación.

2.4 Presupuestos

A continuación se muestra la inversión que hizo la empresa de Papelera Nacional para poder formar el departamento de Mantenimiento Predictivo incluido el Instrumento de Medición.

Cabe señalar que en el presupuesto que se presenta en el **Apéndice B** solo están incluidos los costos del Software de Vibración, los equipos que se necesitaron para poner en marcha la creación del departamento y el costo de la Hora – Hombre por las cuatro personas que conforman el departamento de Mantenimiento predictivo, y que fueron expuestos en el punto 2.3.

CAPÍTULO 3

3. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE MANTENIMIENTO UTILIZADO DESDE EL 2003

PAPELERA NACIONAL S.A. en el año 2003 implementó el sistema de control de vibración con su respectivo colector, el cual le da a sus equipos una gran confiabilidad, pero uno de los objetivos que se desean alcanzar es determinar el porcentaje de confiabilidad del sistema instalado, la cual con sus respectivos análisis y una debida pero exacta evaluación ir controlando ciertos parámetros que permitan que los equipos a más de mejorar su vida útil incremente la disponibilidad de los equipos y disminuya los tiempos de intervención.

El sistema está formado por uno o varios sensores de vibraciones (acelerómetros) los cuales son colocados en varios puntos de las máquinas que se deseen monitorear, estos sensores o transductores se encargan de transformar las vibraciones en señales eléctricas. Luego, estas señales eléctricas, a través de la tarjeta de adquisición de datos son ingresadas a un computador en donde se realizan diferentes tipos de procesamiento para

obtener toda la información que se requiere para el análisis y monitoreo de las vibraciones de las máquinas.

3.1 Técnicas predictivas aplicadas a máquinas rotativas

La medición y análisis de vibración como técnica de prevención y diagnóstico de fallas mecánicas de máquinas en operación, constituye actualmente la técnica fundamental de todo plan de *"Mantenimiento Predictivo".*

Esta técnica ampliamente ejecutada durante años en la industria aeroespacial, se encuentra hoy en día a nuestro alcance. La empresa Papelera dispone de equipos de última tecnología y personal capacitado con experiencia en la materia, la cual permite trabajar con total idoneidad y vocación de servicio.
Por estas razones está en condiciones de brindar un servicio, alcanzando los siguientes objetivos:

- Determinar cuando se requiere un trabajo de mantenimiento en alguna pieza especifica de un equipo en operación.
- Eliminar el desmantelamiento innecesario para inspecciones internas.
- Incrementar el tiempo de disponibilidad de los equipos.
- Aumentar la confiabilidad de los equipos o línea de producción.
- Aprovechar los componentes de los mismos durante toda su vida útil.

- Determinar previo a un paro programado de planta cuales equipos requieren mantenimiento consiguiendo así, a través de ello obtener óptimos resultados en la gestión, ya que solo se realizarán las reparaciones necesarias.

Además esta técnica supone la medición de diversos parámetros que muestren una relación predecible con el ciclo de vida del componente. Algunos ejemplos de dichos parámetros son los siguientes:

- Vibración de cojinetes
- Temperatura de las conexiones eléctricas
- Resistencia del aislamiento de la bobina de un motor

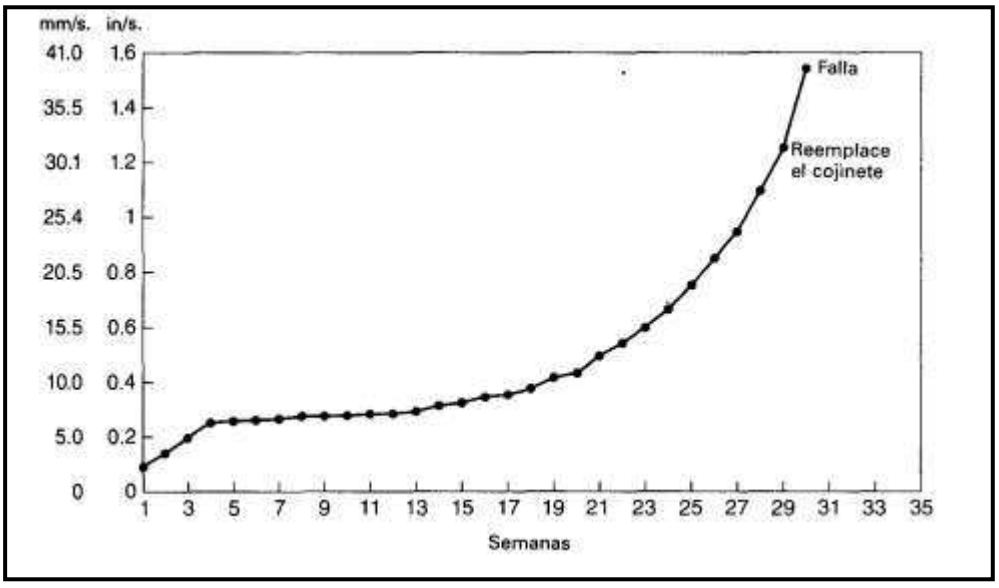


Figura 3.1 Ciclo de vida del cojinete

El uso del mantenimiento predictivo consiste en establecer, en primer lugar, una perspectiva histórica de la relación entre la variable seleccionada y la vida del componente. Esto se logra mediante la toma de lecturas (por ejemplo la vibración de un cojinete) en intervalos periódicos hasta que el componente falle. La figura muestra una curva típica que resulta de graficar la variable (vibración) contra el tiempo. Como la curva lo sugiere, deberán reemplazarse los cojinetes subsecuentes cuando la vibración alcance 1,25 in/seg (31,75 mm/seg). Los fabricantes de instrumentos y software para el mantenimiento predictivo pueden recomendar rangos y valores para reemplazar los componentes de la mayoría de los equipos, esto hace que el análisis histórico sea innecesario en la mayoría de las aplicaciones.

3.2 Descripción del mantenimiento predictivo y sus diferentes métodos

El mantenimiento predictivo es una técnica para pronosticar el punto futuro de falla de un componente de una máquina, de tal forma que dicho componente pueda reemplazarse, con base en un plan, justo antes de que falle. Así, el tiempo muerto del equipo se minimiza y el tiempo de vida del componente se maximiza.

METODOLOGÍA DE LAS INSPECCIONES.

Una vez determinada la factibilidad y conveniencia de realizar un mantenimiento predictivo a una máquina o unidad, el paso siguiente es determinar la o las variables físicas a controlar que sean indicativas de la condición de la máquina. El objetivo de esta parte es revisar en forma

detallada las técnicas comúnmente usadas en el monitoreo según condición, de manera que sirvan de guía para su selección general. La finalidad del monitoreo es obtener una indicación de la condición (mecánica) o estado de salud de la máquina, de manera que pueda ser operada y mantenida con seguridad y economía.

Por monitoreo, se entendió en sus inicios, como la medición de una variable física que se considera representativa de la condición de la máquina y su comparación con valores que indican si la máquina está en buen estado o deteriorada. Con la actual automatización de estas técnicas, se ha extendido la acepción de la palabra monitoreo también a la adquisición, procesamiento y almacenamiento de datos. De acuerdo a los objetivos que se pretende alcanzar con el monitoreo de la condición de una máquina debe distinguirse entre vigilancia, protección, diagnóstico y pronóstico.

- Vigilancia de máquinas. Su objetivo es indicar cuándo existe un problema. Debe distinguir entre condición buena y mala, y si es mala indicar cuán mala es.
- Protección de máquinas. Su objetivo es evitar fallas catastróficas. Una máquina está protegida, si cuando los valores que indican su condición llegan a valores considerados peligrosos, la máquina se detiene automáticamente.
- Diagnóstico de fallas. Su objetivo es definir cuál es el problema específico. Pronosticar la esperanza de vida. Su objetivo es estimar cuánto tiempo más podría funcionar la máquina sin riesgo de una falla catastrófica.

En el último tiempo se ha dado la tendencia a aplicar mantenimiento predictivo o sintomático, sea esto mediante vibroanálisis, análisis de aceite usado, control de desgastes, etc.

Existen varias técnicas aplicadas para el mantenimiento predictivo entre las cuales tenemos las siguientes:

1. Análisis de vibraciones.

El interés de las Vibraciones Mecánicas llega al Mantenimiento Industrial de la mano del Mantenimiento Preventivo y Predictivo, con el interés de alerta que significa un elemento vibrante en una Máquina, y la necesaria prevención de las fallas que traen las vibraciones a medio plazo como lo muestra la figura 3.2 y 3.3.

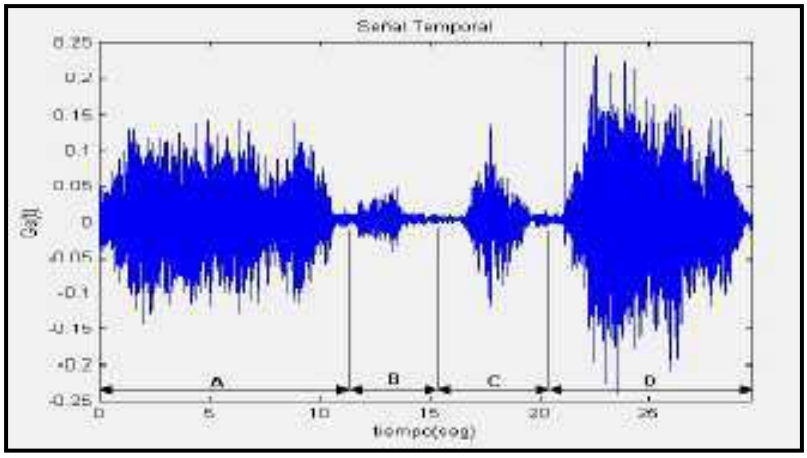


Figura 3.2 Registro de vibraciones en un ciclo de trabajo de la pala

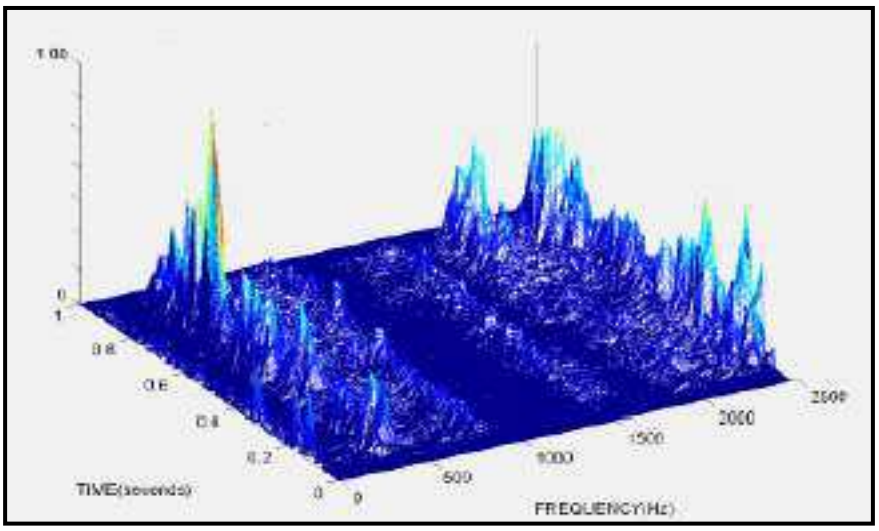


Figura 3.3 Transformada Tiempo-Frecuencia.

El interés principal para el mantenimiento deberá ser la identificación de las amplitudes predominantes de las vibraciones detectadas en el elemento o máquina, la determinación de las causas de la vibración, y la corrección del problema que ellas representan. Las consecuencias de las vibraciones mecánicas son el aumento de los esfuerzos y las tensiones, pérdidas de energía, desgaste de materiales, y las más temidas: daños por fatiga de los materiales, además de ruidos molestosos en el ambiente laboral, etc.

Parámetros de las vibraciones.

- *Frecuencia*: Es el tiempo necesario para completar un ciclo vibratorio. En los estudios de Vibración se usan los CPM (ciclos por minuto) o HZ (hercios).
- *Desplazamiento*: Es la distancia total que describe el elemento vibrante, desde un extremo al otro de su movimiento.
- *Velocidad y Aceleración:* Como valor relacional de los anteriores.
- *Dirección*: Las vibraciones pueden producirse en 3 direcciones lineales y 3 rotacionales

Tipos de vibraciones.

Vibración libre: causada por un sistema que vibra debido a una excitación instantánea.

Vibración forzada: causada por un sistema que vibra debido a una excitación constante de las causas de las vibraciones mecánicas

A continuación detallamos las razones más habituales por las que una máquina o elemento de la misma puede llegar a vibrar

1. Vibración debida al Desequilibrado (maquinaria rotativa).
2. Vibración debida a la Falta de Alineamiento (maquinaria rotativa)
3. Vibración debida a la Excentricidad (maquinaria rotativa).
4. Vibración debida a la Falla de Rodamientos y cojinetes.
5. Vibración debida a problemas de engranajes y correas de Transmisión (holguras, falta de lubricación, roces, etc.)

2. Análisis de lubricantes.

Estos se ejecutan dependiendo de la necesidad, según:

Análisis Iniciales: se realizan a productos de aquellos equipos que presenten dudas provenientes de los resultados del Estudio de Lubricación y permiten correcciones en la selección del producto, motivadas a cambios en condiciones de operación.

Análisis Rutinarios: se aplican a equipos considerados como críticos o de gran capacidad, en los cuales se define una frecuencia de muestreo, siendo el objetivo principal de los análisis, la determinación del estado del aceite, nivel de desgaste y contaminación entre otros.

Análisis de Emergencia: se efectúan para detectar cualquier anomalía en el equipo y/o lubricante, según:

- Contaminación con agua
- Sólidos (filtros y sellos defectuosos).
- Uso de un producto inadecuado

Equipos

- Bombas de extracción
- Envases para muestras
- Etiquetas de identificación
- Formatos

Figura 3.4 Bomba de extracción

Este método asegura que tendremos:

- Máxima reducción de los costos operativos
- Máxima vida útil de los componentes con mínimo desgaste
- Máximo aprovechamiento del lubricante utilizado
- Mínima generación de efluentes

En cada muestra podemos conseguir o estudiar los siguientes factores que afectan a nuestra máquina:
Elementos de desgaste: Hierro, Cromo, Molibdeno, Aluminio, Cobre, Estaño, Plomo.
Conteo de partículas: Determinación de la limpieza, ferrografía.
Contaminantes: Silicio, Sodio, Agua, Combustible, Hollín, Oxidación,

Nitración, Sulfatos, Nitratos.
Aditivos y condiciones del lubricante: Magnesio, Calcio, Zinc, Fósforo, Boro, Azufre, Viscosidad.
Gráficos e historial: Para la evaluación de las tendencias a lo largo del tiempo.

De este modo, mediante la implementación de técnicas ampliamente investigadas y experimentadas, y con la utilización de equipos de la más avanzada tecnología, se logrará disminuir drásticamente:

Tiempo perdido en producción en razón de desperfectos mecánicos.

Desgaste de las máquinas y sus componentes.

Horas hombre dedicadas al mantenimiento.

Consumo general de lubricantes

3. Análisis por ultrasonido.

Este método estudia las ondas de sonido de baja frecuencia producidas por los equipos que no son perceptibles por el oído humano.

Ultrasonido pasivo: Es producido por mecanismos rotantes, fugas de fluido, pérdidas de vacío, y arcos eléctricos. Pudiéndose detectarlo mediante la tecnología apropiada como se muestra en la figura 3.5.

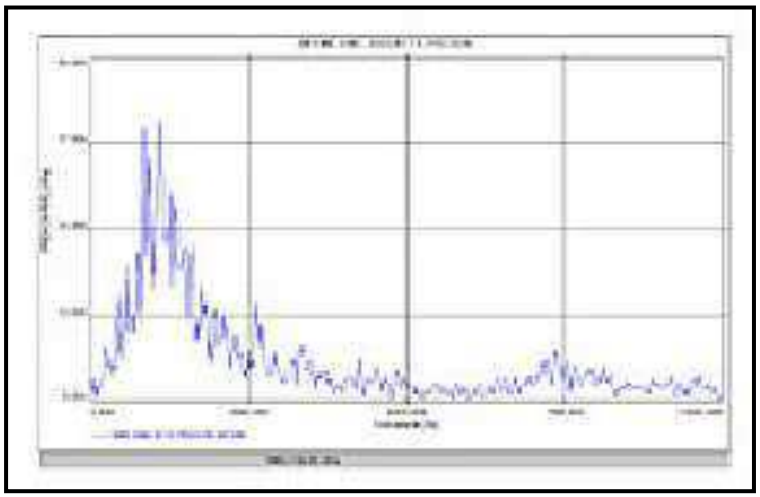


Figura 3.5 Frecuencia de Ultrasonido

El Ultrasonido permite:
Detección de fricción en máquinas rotativas
Detección de fallas y/o fugas en válvulas
Detección de fugas de fluidos
Pérdidas de vacío
Detección de "arco eléctrico"
Verificación de la integridad de juntas de recintos estancos

Se denomina *Ultrasonido Pasivo* a la tecnología que permite captar el ultrasonido producido por diversas fuentes.

El sonido cuya frecuencia está por encima del rango de captación del oído humano (20-a-20.000 Hz) se considera ultrasonido. Casi todas las fricciones mecánicas, arcos eléctricos y fugas de presión o vacío producen ultrasonido en un rango aproximado a los 40 Khz Frecuencia con características muy aprovechables en el Mantenimiento Predictivo, puesto que las ondas sonoras son de corta longitud atenuándose rápidamente sin producir rebotes. Por esta razón, el ruido ambiental por

más intenso que sea, no interfiere en la detección del ultrasonido. Además, la alta direccionalidad del ultrasonido en 40 Khz. permite con rapidez y precisión la ubicación de la falla.

La aplicación del análisis por ultrasonido se hace indispensable especialmente en la detección de fallas existentes en equipos rotantes que giran a velocidades inferiores a las 300 RPM, donde la técnica de medición de vibraciones se transforma en un procedimiento ineficiente.

De modo que la medición de ultrasonido es en ocasiones complementaria con la medición de vibraciones, que se utiliza eficientemente sobre equipos rotantes que giran a velocidades superiores a las 300 RPM.

Al igual que en el resto del mundo industrializado, la actividad industrial en nuestro país tiene la imperiosa necesidad de lograr el perfil competitivo que le permita insertarse en la economía globalizada. En consecuencia, toda tecnología orientada al ahorro de energía y/o mano de obra es de especial interés para cualquier empresa.

4. Termografía.

La Termografía Infrarroja es una técnica que permite, a distancia y sin ningún contacto, medir y visualizar temperaturas de superficie con precisión.

El ojo humano no es sensible a la radiación infrarroja emitida por un objeto, pero la cámara termográfica, o de termovisión, es capaz de medir la energía con sensores infrarrojos, capacitados para "ver" en estas longitudes de onda. Esto permite medir la energía radiante emitida por objetos y, por consiguiente, determinar la temperatura de la superficie a distancia, en tiempo real y sin contacto.

La gran mayoría de los problemas y averías en el entorno industrial - ya sea de tipo mecánico, eléctrico y de fabricación - están precedidos por cambios de temperatura que pueden ser detectados mediante la monitorización de temperatura con sistema de Termovisión por Infrarrojos. Con la implementación de programas de inspecciones termográficas en instalaciones, maquinaria, cuadros eléctricos, etc. es posible minimizar el riesgo de una falla de equipos y sus consecuencias, a la vez que también ofrece una herramienta para el control de calidad de las reparaciones efectuadas.

El análisis mediante Termografía infrarroja debe complementarse con otras técnicas y sistemas de ensayo conocidos, como pueden ser el análisis de aceites lubricantes, el análisis de vibraciones, los ultrasonidos pasivos y el análisis predictivo en motores eléctricos. Pueden añadirse los ensayos no destructivos clásicos: ensayos, radiográfico, el ultrasonido activo, partículas magnéticas, etc.

El análisis mediante Cámaras Termográficas Infrarrojas, está recomendado para:

- Instalaciones y líneas eléctricas de Alta y Baja Tensión.

- Cuadros, conexiones, bornes, transformadores, fusibles y empalmes eléctricos.
- Motores eléctricos, generadores, bobinados, etc.
- Reductores, frenos, rodamientos, acoplamientos y embragues mecánicos.
- Hornos, calderas e intercambiadores de calor.
- Instalaciones de climatización.
- Líneas de producción, corte, prensado, forja, tratamientos térmicos.

Las ventajas que ofrece el Mantenimiento Preventivo por Termovisión son:

- Método de análisis sin detención de procesos productivos, por lo que ahorra gastos.
- Baja peligrosidad para el operario, por evitar la necesidad de contacto con el equipo.
- Determinación exacta de puntos deficientes en una línea de proceso.
- Reduce el tiempo de reparación, por la localización precisa de la falla.
- Facilita informes muy precisos al personal de mantenimiento.
- Ayuda al seguimiento de las reparaciones previas.

5. Análisis por árbol de fallas.

El Análisis por Árboles de Fallas (AAF), es una técnica deductiva que se centra en un suceso accidental particular (accidente) y proporciona un método para determinar las causas que han producido dicho accidente. Nació en la década de los años 60 para la verificación de la fiabilidad de diseño del cohete Minuteman y ha sido ampliamente utilizado en el campo nuclear y químico. El hecho de su gran utilización se basa en que puede proporcionar resultados tanto cualitativos mediante la búsqueda de caminos críticos, como cuantitativos, en términos de probabilidad de fallas de componentes.

Para el tratamiento del problema se utiliza un modelo gráfico que muestra las distintas combinaciones de fallos de componentes y/o errores humanos cuya ocurrencia simultánea es suficiente para desembocar en un suceso accidental.

La técnica consiste en un proceso deductivo basado en las leyes del Álgebra de Boole, que permite determinar la expresión de sucesos complejos estudiados en función de los fallos básicos de los elementos que intervienen en él.

Consiste en descomponer sistemáticamente un suceso complejo (por ejemplo rotura de un depósito de almacenamiento de amoníaco) en sucesos intermedios hasta llegar a sucesos básicos, ligados normalmente a fallas de componentes, errores humanos, errores operativos, etc. Este proceso se realiza enlazando dichos tipos de

sucesos mediante lo que se denomina puertas lógicas que representan los operadores del álgebra de sucesos.

Cada uno de estos aspectos se representa gráficamente durante la elaboración del árbol mediante diferentes símbolos que representan los tipos de sucesos, las puertas lógicas y las transferencias o desarrollos posteriores del árbol.

Un ejemplo de árbol de fallas es el siguiente:

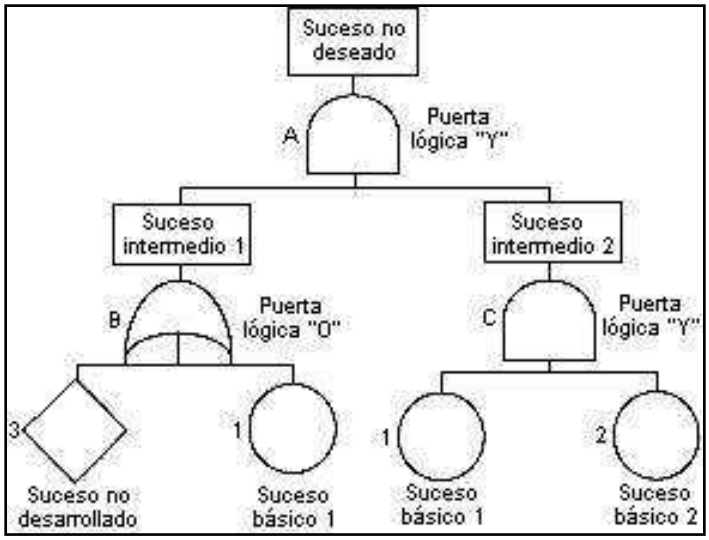
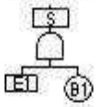
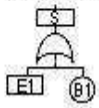
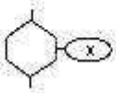


Figura 3.6 Representación gráfica del árbol de fallas

Los símbolos representan tanto sucesos, puertas lógicas y transferencias. Los más importantes son los siguientes:

TABLA 4

Símbolos utilizados para la representación del árbol de fallas

SÍMBOLOS	SIGNIFICADO DEL SÍMBOLO
	SUCESO BÁSICO. No requiere de posterior desarrollo al considerarse un suceso de fallo básico.
	SUCESO NO DESARROLLADO. No puede ser considerado como básico, pero sus causas no se desarrollan, sea por falta de información o por su poco interés.
	SUCESO INTERMEDIO. Resultante de la combinación de sucesos más elementales por medio de puertas lógicas. Asimismo se representa en un rectángulo el "suceso no deseado" del que parte todo el árbol.
	PUERTA "Y"  El suceso de salida (S) ocurrirá si, y sólo si ocurren todos los sucesos de entrada (E1 B1).
	PUERTA "O"  El suceso de salida (S) ocurrirá si ocurren uno o más de los sucesos de entrada (E1 B1).
	SÍMBOLO DE TRANSFERENCIA. Indica que el árbol sigue en otro lugar.
	PUERTA "Y" PRIORITARIA. El suceso de salida ocurrirá si, y sólo si todas las entradas ocurren en una secuencia determinada, que normalmente se especifica en una elipse dibujada a la derecha de la puerta.
	PUERTA "O" EXCLUSIVA. El suceso de salida ocurrirá si lo hace una de las entradas, pero no dos o más de ellas.
	PUERTA DE INHIBICIÓN. La salida ocurrirá si, y sólo si lo hace su entrada y además se satisface una condición dada (X).

6. Análisis FMECA.

Otra útil técnica para la eliminación de las características de diseño deficientes es el análisis de los modos y efectos de fallas (FMEA); o análisis de modos de fallas y efectos críticos (FMECA)

La intención es identificar las áreas o ensambles que es más probable que den lugar a fallas del conjunto.

El FMEA define la función como la tarea que realiza un componente por ejemplo, la función de una válvula es abrir y cerrar y los modos de fallo son las formas en las que el componente puede fallar. La válvula fallará en la apertura si se rompe su resorte, pero también puede tropezar en su guía o mantenerse en posición de abierta por la leva debido a una rotura en la correa de árbol de levas.

La técnica consiste en evaluar tres aspectos del sistema y su operación:

- Condiciones anticipadas de operación, y la falla más probable.
- Efecto de falla en el rendimiento.
- Severidad del fallo en el mecanismo.

La probabilidad de fallas se evalúa generalmente en una escala de 1 a 10, con la criticidad aumentando con el valor del número.

Esta técnica es útil para evaluar soluciones alternativas a un problema pero no es fácil de usar con precisión en nuevos diseños.

El FMEA es útil para evaluar si hay en un ensamble un número innecesario de componentes puesto que la interacción de un ensamble con otro multiplicará los efectos de un fallo. Es igualmente útil para analizar el producto y el equipo que se utiliza para producirlo.

El FMEA, ayuda en la identificación de los modos de falla que es probable que causen problemas de uso del producto. Ayuda también a eliminar debilidades o complicaciones excesivas del diseño, y a identificar los componentes que pueden fallar con mayor probabilidad. Su empleo no debe confinarse al producto que se desarrolla por el grupo de trabajo. Puede también usarse eficazmente para evaluar las causas de parada en las máquinas de producción antes de completar el diseño.

3.3 Ventajas del uso del mantenimiento predictivo con respecto a los métodos tradicionales

La ventaja más importante del mantenimiento predictivo de equipo industrial mecánico es un grado de preparación más alto de la planta, debido a una confiabilidad más alta del equipo.

El establecer una tendencia sobre tiempo de las fallas que se empiezan a desarrollar se puede hacer con precisión y las operaciones de mantenimiento se pueden planificar de tal manera que coincidan con paros programados de la planta. Muchas industrias reportan

incrementos de productividad del 2% al 10% debido a prácticas de mantenimiento predictivo.

A continuación se muestran algunas ventajas importantes sobre el uso de este tipo de mantenimiento:

- Las fallas se detectan en sus etapas iniciales por lo que se cuenta con suficiente tiempo para hacer la planeación y la programación de las acciones correctivas (mantenimiento correctivo) en paros programados y bajo condiciones controladas que minimicen los tiempos muertos y el efecto negativo sobre la producción y que además garanticen una mejor calidad de reparaciones.
- Las técnicas de detección del mantenimiento predictivo son en su mayor parte técnicas "on-condition" que significa que las inspecciones se pueden realizar con la maquinaria en operación a su velocidad máxima.
- El mantenimiento predictivo es mantenimiento proactivo ya que permite administrar las fallas antes de que ocurran en operación y no después como lo hace el mantenimiento reactivo.
- Es parte del mantenimiento preventivo, pero en este caso las intervenciones en las máquinas se realizan cuando hay evidencia de deterioro de algún componente o de mal funcionamiento del sistema.
- Consiste en la monitorización de la condición mecánica, rendimiento de la operación y otros indicadores de proceso en máquinas y líneas de producción para asegurar el mayor intervalo de tiempo entre reparaciones y minimizar el número y costo de las paradas ocasionadas por las fallas en las máquinas.

- Con él se conoce el estado de nuestros equipos y del proceso en todo instante.
- Se elimina prácticamente todas las averías.
- Se incrementa los períodos entre paradas.
- Cuando se realiza una intervención se conoce el problema, reduciendo el tiempo de la misma.
- Se puede determinar la causa de fallas crónicas.
- Se reduce el número de piezas en almacén, ya que éstas se abastecerán una vez detectado el problema.
- Se incrementa la seguridad.
- Se puede obtener bonificaciones en las pólizas de seguro de nuestros equipos.
- Se mejora el proceso productivo.
- Se reduce los consumos energéticos innecesarios, eliminando vibraciones no deseadas, ocasionadas por defectos en el funcionamiento de las máquinas, desequilibrios, desalineaciones, etc.
- La rentabilidad del mismo es a medio y largo plazo.
- Es necesaria una alta inversión inicial en tecnología y formación del personal.

3.4 Instrumentación Utilizada

El sistema Microlog CMXA50 es utilizado por el personal de mantenimiento de máquinas que necesita obtener y analizar datos de vibraciones de las partes giratorias para intentar reducir los costos de mantenimiento y los tiempos de inactividad.

El sistema Microlog CMXA50 se compone de tres elementos:

- Un colector de datos Microlog CMXA50,
- Un equipo host con Machine Analyst, PRISM4 para Windows o software equivalente y
- Una fuente de alimentación.

3.4.1 Descripción del Software de Vibración

El software de vibración denominado PRISM4 es el encargado de realizar el análisis de vibración a través de espectros de vibración como se muestra en la figura 3.7 y mediante el cual se puede tener una idea de lo que está pasando en los equipos y poder tomar medidas correctivas, es decir aplicar el mantenimiento predictivo.

En la implementación del sistema se realiza el acuerdo sobre la forma de estructurar la información en el software Prism4, el establecimiento de áreas dentro de la base de datos, y la configuración de los puntos de medición.

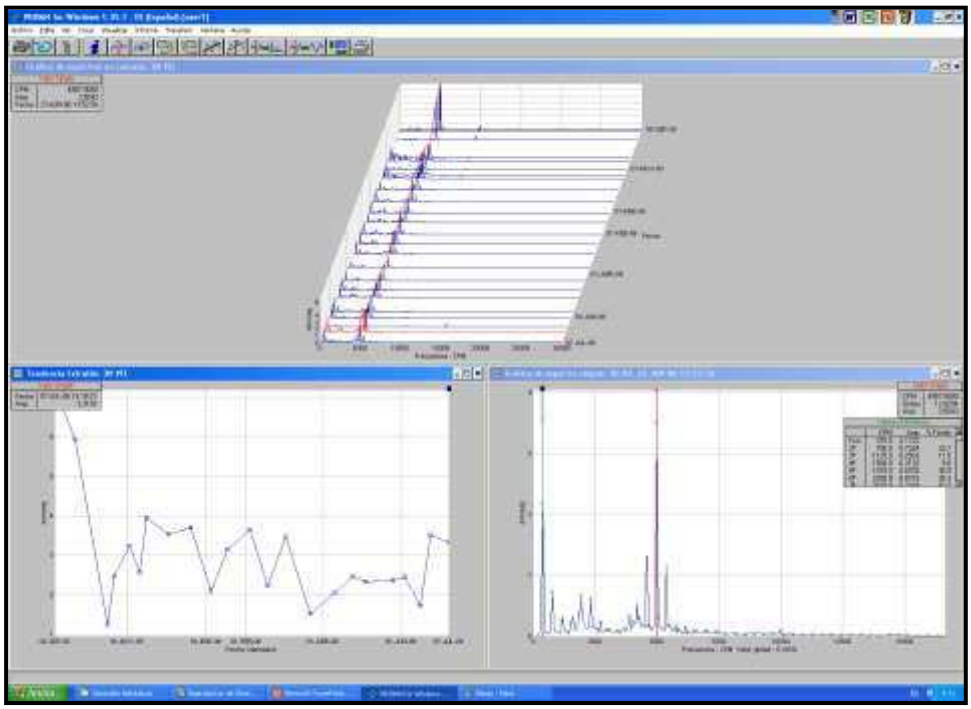


Figura 3.7 Espectros de vibración en el software

El software Prism4 contiene una base de datos con rodamientos de diferentes marcas y además con sus características geométricas, necesarias para los cálculos de frecuencias de fallas. El caso muestra la asignación de un rodamiento SKF 6313 como se muestra en la figura 3.8. La precisión de este cálculo dependerá de que el rodamiento asignado corresponda enteramente con el rodamiento en funcionamiento, y que las RPM configurada en la base de datos sean las correctas.

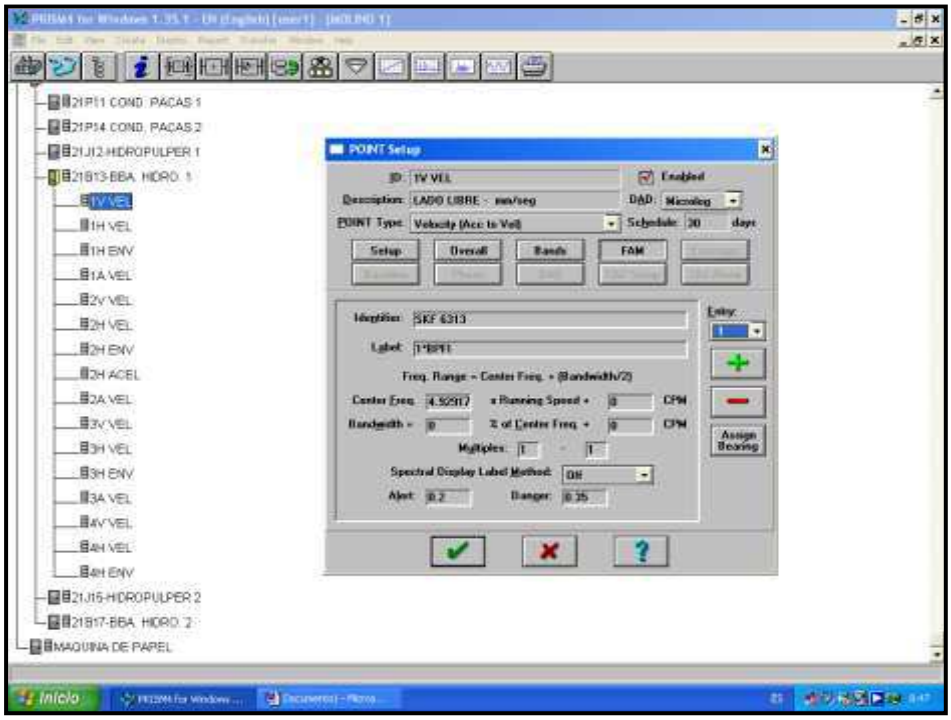


Figura 3.8 Asignación de un rodamiento SKF 6313

3.4.2 Breve descripción del colector utilizado en la toma de vibración

El colector de datos Microlog CMXA50 es un terminal de adquisición y almacenamiento de datos portátil y ligero.

Registra vibraciones, temperaturas y otras mediciones de control del estado de la maquinaria. Junto con los controles visuales, el

Microlog CMXA50 permite realizar análisis detallados de la maquinaria en los entornos industriales más difíciles.

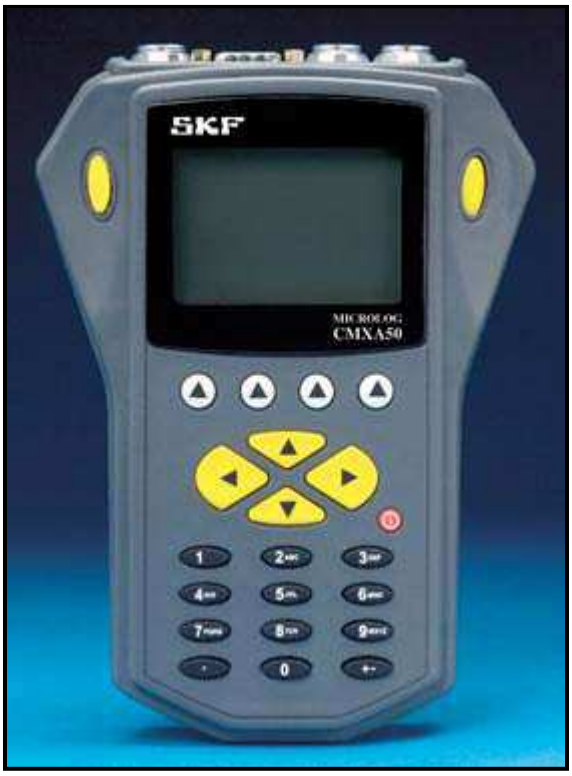


Figura 3.9 El Colector (Microlog CMX450)

El CMXA50 y sus ampliaciones ejecutan todas las tareas necesarias para un mantenimiento preventivo de la maquinaria. Registra automáticamente mediciones dinámicas (vibraciones) y estáticas (proceso) de casi todas las fuentes, ofrece pantallas de configuración fáciles de usar que permiten captar rápidamente datos relacionados con aplicaciones específicas como por

ejemplo el equilibrado, y permite al usuario configurar hasta 12 mediciones para la obtención automática de datos por ubicación de un sensor.

El CMXA50 que se muestra en la figura 3.9 puede usarse con diferentes dispositivos de entrada. Las mediciones de vibración se registran mediante una sonda magnética o manual, sensores fijos o un sistema de control de maquinaria instalado. Las mediciones de temperatura se obtienen mediante un sensor infrarrojo de proximidad o una sonda de contacto.

Los valores leídos en otros indicadores pueden introducirse en el CMXA50 utilizando las correspondientes teclas alfanuméricas del teclado del CMXA50. También pueden introducirse como notas codificadas las observaciones personales realizadas.

Además de funcionar como colector de datos, el CMXA50 reúne todas las características y capacidades de un potente analizador que permite capturar y visualizar espectros de alta resolución para efectuar análisis detallados. En la pantalla de cristal líquido (LCD) pueden visualizarse espectros de frecuencia de Transformación Rápida de Fourier (FFT).

Indicadores LCD

En la obtención de datos, los tres indicadores LCD situados a la derecha encima de la pantalla muestran el estado de medición

mientras se reciben los datos. En la obtención de datos, la pantalla LCD puede ofrecer los aspectos siguientes:

Ámbar solamente – Obtención de datos en curso.

Verde solamente – Obtención de datos finalizada, resultados de medición correctos.

Rojo y verde – Obtención de datos finalizada, resultados de medición en zona de alarma.

Ámbar y verde – Obtención de datos en curso, la estabilización tarda más de lo esperado.

Rojo, ámbar y verde – La obtención de datos tarda más de lo esperado; posible problema de estabilización del CMXA50. Los resultados de medición pueden no ser válidos.

3.4.3 Definición de parámetros a monitorear, rangos de medición, puntos de toma y establecimientos de criterios de aceptabilidad

Papelera Nacional entregó la información referente a los equipos críticos, y su codificación interna de acuerdo al sistema API PRO (software de administración de mantenimiento). Se realiza el acuerdo sobre la forma de estructurar la información en el software Prism4, el establecimiento de áreas dentro de la base de datos, y la configuración de los puntos de medición. Entre otros puntos se acuerdan las siguientes características en la implementación:

- Se configurará el sensor Triaxial para todas las máquinas, exceptuando los Cilindros Secadores su rodillería asociada, en los cuáles se utilizará sensor Monoaxial de Baja Frecuencia.
- En las máquinas configuradas con sensor Triaxial, se configuran los puntos bajo la siguiente secuencia de acuerdo al diagrama impreso en el sensor: 1 para la dirección Axial, 2 para la dirección Horizontal, y 3 para la dirección Vertical. De esta forma, al realizar la medición se instala el sensor Verticalmente, y se le orienta de forma que coincida la flecha 1 (dirección axial) con el eje de la máquina.
- Se configura la medición del parámetro Velocidad de Vibración (mm/seg) en todas las direcciones. Además la

medición de Aceleración Envolvente (GE) en la dirección Horizontal de cada apoyo. Para motores eléctricos y cajas de engranajes se configura la medición de la Aceleración (G´s) en dirección Horizontal (en motores solo una medición, y en engranajes una a la entrada y otra a la salida).

Se inicia la configuración de los primeros equipos correspondientes al Molino #1, áreas de Preparación de Pasta, y Máquina de Papel. Se configuran en total 7 máquinas, incluyendo en su mayoría los rodamientos instalados, suministrados por el personal del Departamento al consultar en API-PRO. No están totalmente claras aún las RPM en aquellos puntos donde hay correas y engranajes, ni las frecuencias de engranamiento respectivas (no hay datos sobre número de dientes en la mayoría de casos).

No obstante lo anterior, la configuración es procedente en el sentido de que pueden realizarse ajustes en el camino, al igual que completar información pendiente. Esto es gracias a que se ha establecido a nivel Macro, toda la estructura a seguir. La precisión del sistema en sus etapas venideras estará directamente relacionada con la cantidad y calidad de información con que hayan sido alimentadas las bases de datos.

En la figura 3.10 muestra un despliegue de la estructura de datos en construcción para el caso del Molino 1:

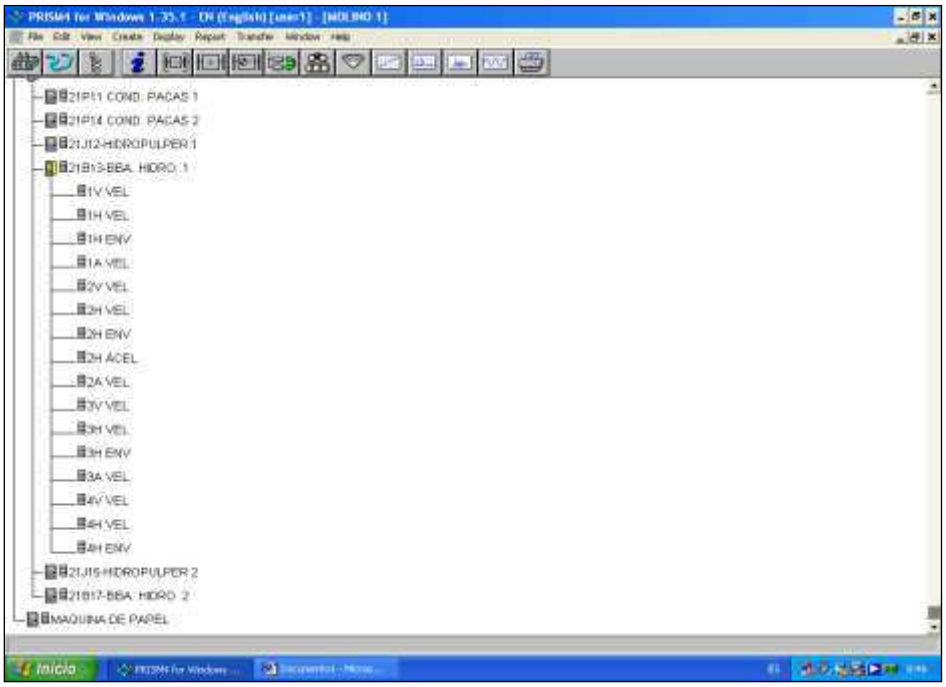


Figura 3.10 Estructura de datos de los puntos de prueba

Se aprecia un listado de máquinas. Dentro de cada máquina se configuran Puntos de medición, en tres direcciones; y para cada dirección hay hasta tres parámetros configurados. Por ejemplo, el punto 2 corresponde al rodamiento del lado acople del motor, 2H significa medición horizontal, mientras que VEL, ENV y ACEL son Velocidad, Aceleración Envolvente y Aceleración respectivamente.

En la figura 3.11 muestra la configuración particular para la medición de Velocidad en el punto 1 Vertical. La ventana identifica el tipo de sensor a utilizar, su sensibilidad, el rango de frecuencia para el análisis espectral, las líneas de resolución, el tipo de función de compensación para la señal, la cantidad de muestras en cada toma, entre otros.

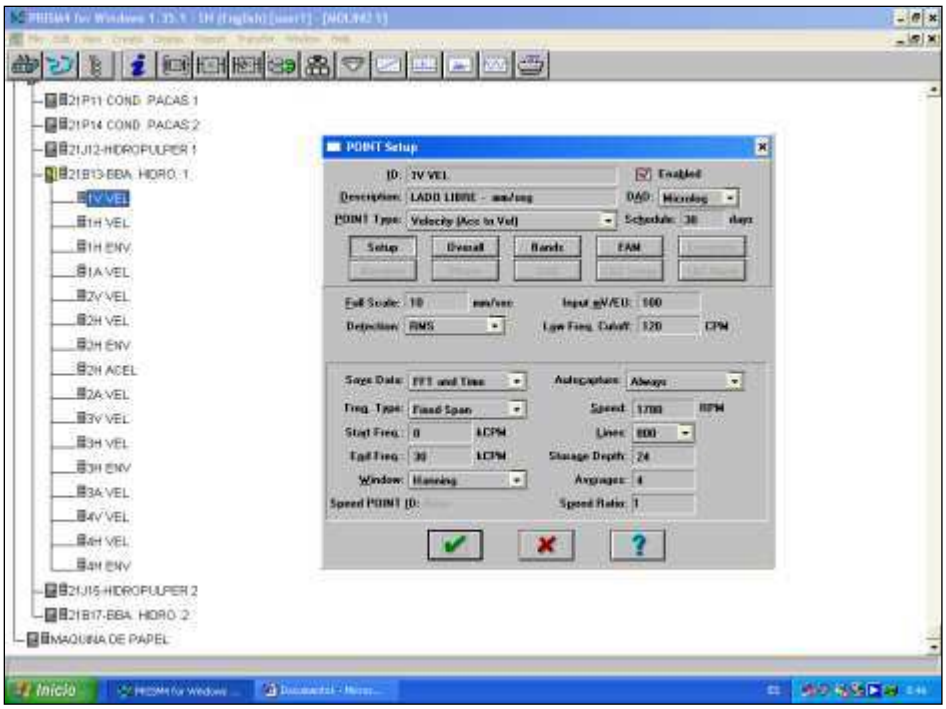


Figura 3.11 Configuración de medición en el punto 1V VEL

En la figura 3.12 corresponde a otro aspecto de la configuración del punto. Es respecto a la asignación del rodamiento que corresponde con el punto evaluado. El software Prism4 contiene

una base de datos con rodamientos de diferentes marcas y además con sus características geométricas, necesarias para los cálculos de frecuencias de fallas. El caso muestra la asignación de un rodamiento SKF 6313. La precisión de este cálculo dependerá de que el rodamiento asignado corresponda enteramente con el rodamiento en funcionamiento, y que las RPM configurada en la base de datos sean las correctas.

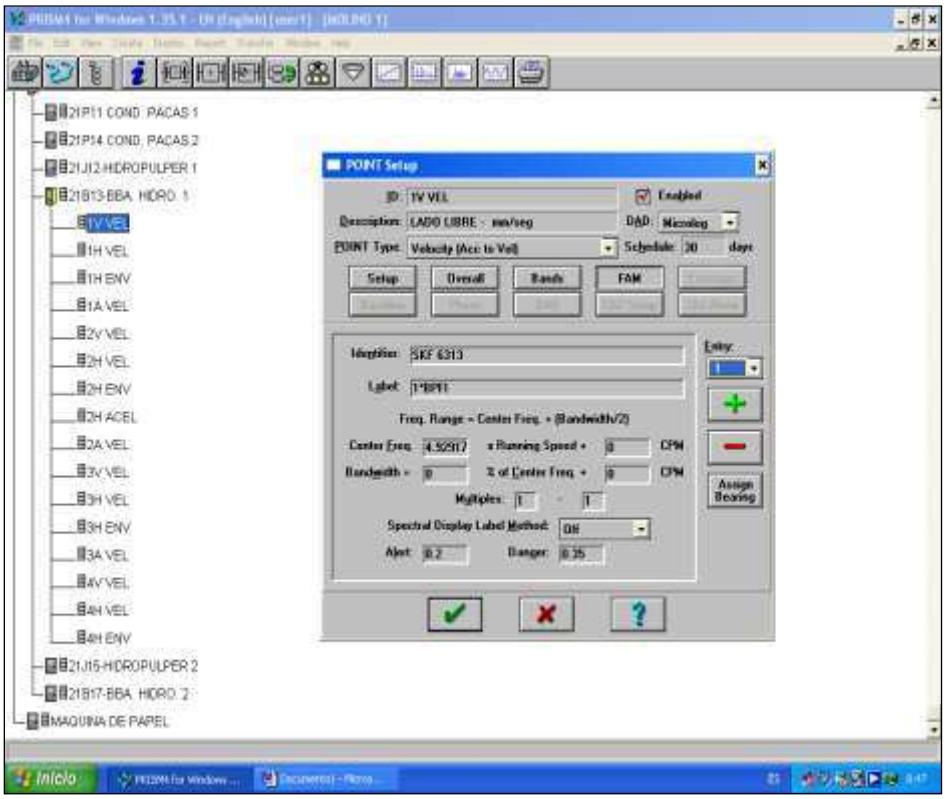


Figura 3.12 Configuración del punto de prueba con respecto a la asignación del Rodamiento

En la figura 3.13 presenta otra característica que permite a Prism4 identificar y realizar seguimiento de aspectos particulares del comportamiento vibratorio de una máquina. El caso muestra la configuración de tres bandas para realizar el seguimiento específico de la vibración alrededor de 1X, 2X y 2FL (frecuencia fundamental, primer armónico, y frecuencia eléctrica característica).

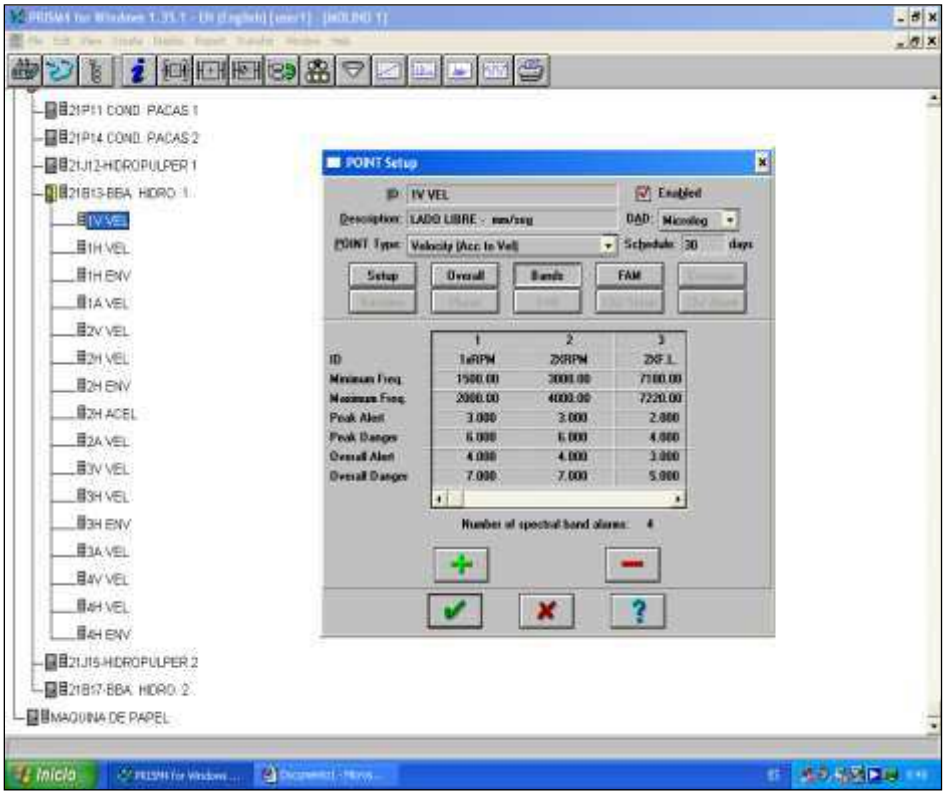


Figura 3.13 Configuración de 3 bandas en los puntos 1x,2x y 2FL

Una vez establecida la configuración para las mediciones con sensor Triaxial, se realizan pruebas de campo para verificar la funcionalidad de la medición con tal sensor. Inicialmente, se utilizará el sensor Triaxial instalado con base magnética, dado que no están aún disponibles los adaptadores rápidos en cada punto de medición. SKF recomienda la adquisición o fabricación de tales conectores para como garantía de mejor calidad y consistencia en las mediciones.

Se hace énfasis en la sintaxis de la descripción de los puntos, ya que es la base para que el analizador Microlog CMXA50 realice la secuencia en forma automática. Como ejemplo, las configuraciones Triaxiales quedan de la siguiente forma para un motor eléctrico, en el rodamiento del lado libre

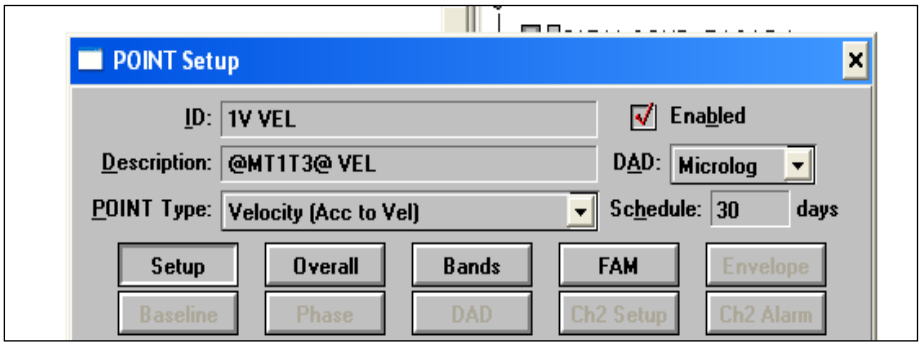


Figura 3.14 Medición Vertical en Velocidad (mm/seg)

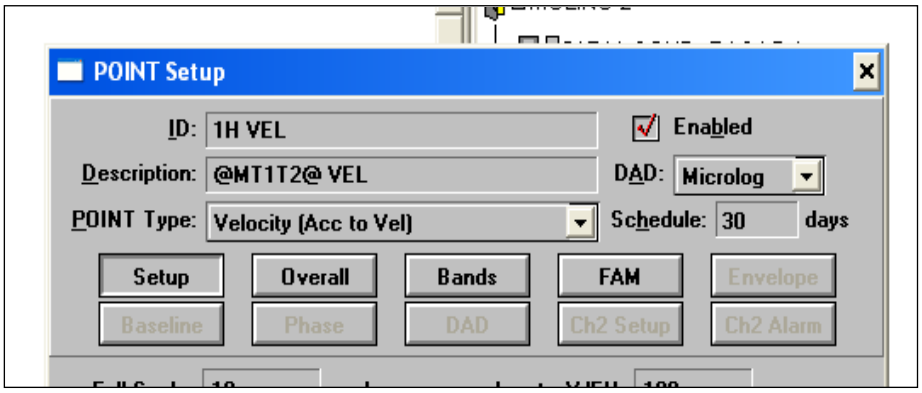
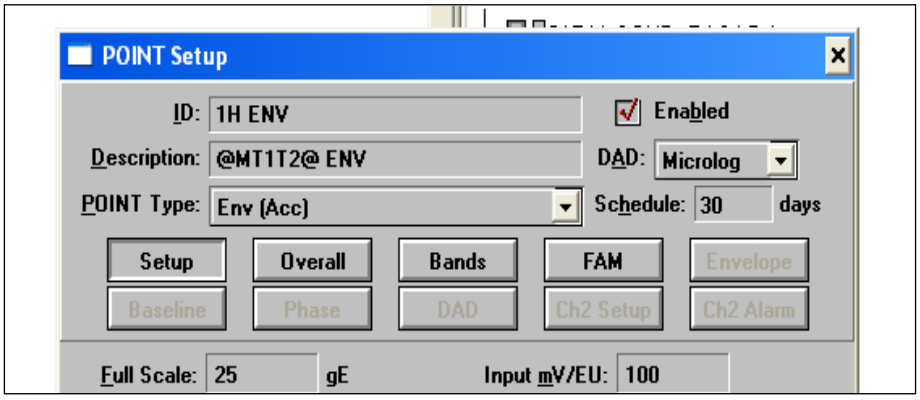


Figura 3.15 Medición Horizontal en Velocidad (mm/seg)



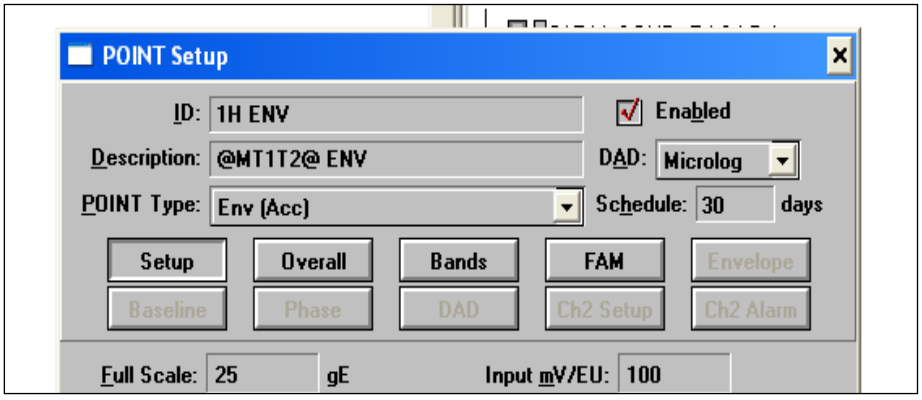


Figura 3.16 Medición Horizontal en Aceleración Envolvente (GE)

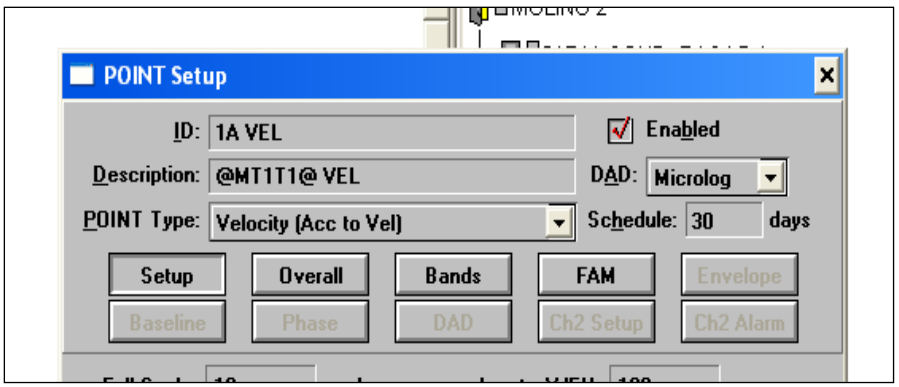


Figura 3.17 Medición Axial en Velocidad (mm/seg)

Parámetros de medición

Existen varias variables para medir la amplitud de vibración de un espectro. Para vibraciones mecánicas lo más común es medirlas en unidades de desplazamiento, velocidad y aceleración.

Cada una presenta ventajas respecto de las otras, por tanto es recomendable para el analista revisarlas todas. A continuación se describen sus ventajas.

- **Desplazamiento**

La medida en desplazamiento (mm ó µm en SI, mils en S. Inglés) es importante para reconocer patrones que están a muy baja frecuencia. Los picos de vibración que están al comienzo del espectro son mejor resaltados.

Esta es una medida especial para hallar anormalidades en chumaceras de aceite, muy utilizadas en turbomaquinaria.

Viene dado por la propia función de onda senoidal

Usualmente el desplazamiento se da en metros o centímetros.

- **Velocidad**

La medida en velocidad (mm/s en SI, in/s en S. Inglés) permite reconocer la mayoría de los patrones de fallas primarias y de otros componentes cuando están en un estado evidente, como por ejemplo desbalanceo, desalineación, holgura mecánica, fricciones abrasivas, resonancias, pulsaciones, engranajes de pocos dientes, sistema de poleas, aspas de bombas y ventiladores. Esta variable de velocidad es importante para resaltar picos de bajas y medias frecuencias.

La velocidad del movimiento es igual a la proporción del cambio del desplazamiento, o en otras palabras a que tan rápido cambia su posición (respecto al tiempo). La razón de cambio de una cantidad respecto a otra se puede describir con la derivada: $V=dx/dt$

Siendo V la velocidad instantánea.

Se observa que también es una función senoidal pero debido a que usamos la función coseno estará desfasada 90 grados respecto del seno.

- **Aceleración**

La medida en aceleración (mG o G en ambos sistemas de medición) permite reconocer patrones asociados a contactos metal-metal y fricciones abrasivas, problemas en engranajes, cavitación, entre otros. Esta variable resalta picos de vibración de medias y altas frecuencias, y es muy utilizada para la detección prematura de fallas en chumaceras y rodamientos, y otros componentes como engranajes.

Es la función que surge de derivar la velocidad respecto del tiempo.

También aquí hay que notar que la función de aceleración fue desplazada 90 grados respecto a la velocidad, como lo indica el signo negativo.

A continuación se presenta un esquema de una señal vista en las tres variables:

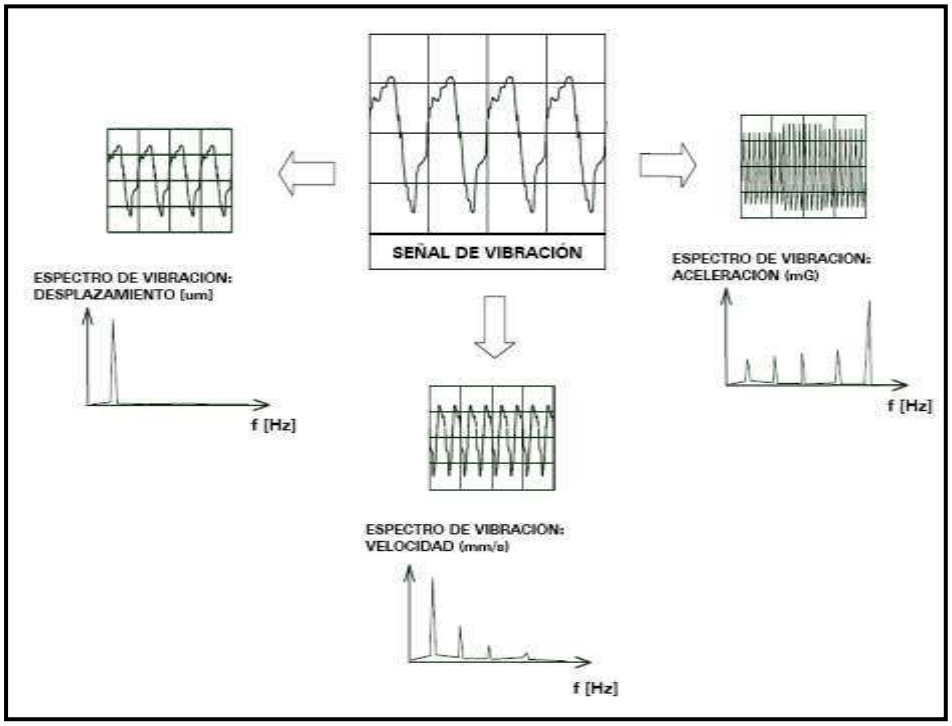


Figura 3.18 Señal de Vibración

Ubicación de los puntos de toma o de prueba

En general es deseable colocar el transductor de prueba lo más cerca posible del rodamiento, con metal sólido entre el rodamiento y el sensor. Se debe evitar la colocación en las gorras de rodamientos, ya que son hechas de metal delgado y conducen muy poca la energía de vibración. Si es posible habrá que seleccionar los lugares de ubicación de tal manera que no haya juntas entre metal y metal, entre el rodamiento y el sensor. La

junta entre la campana y el cárter del estator de un motor es un ejemplo de esto. Cárteres de ventiladores y las extremidades de motores se deben evitar.

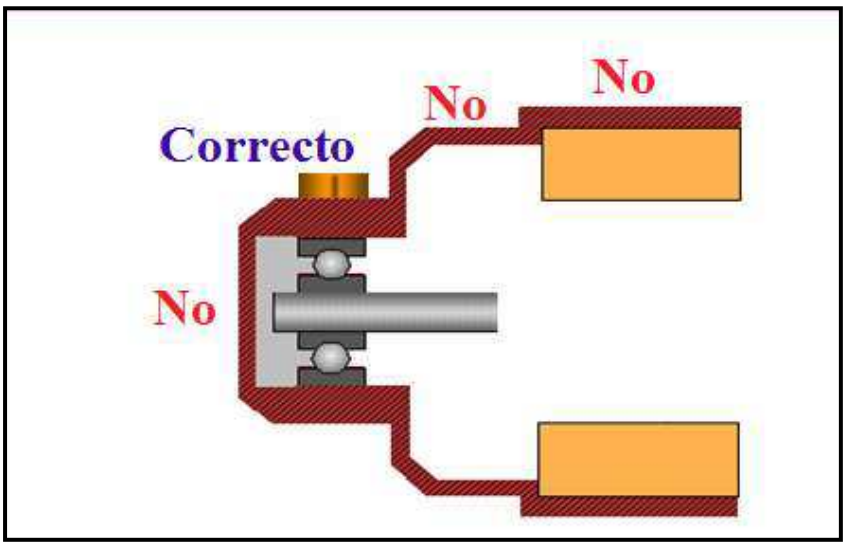


Figura 3.19 Ubicaciones de Acelerómetros

En general se ha encontrado que para motores de menos de alrededor de 50 HP un punto de prueba es adecuado, pero para motores de más de 50 HP cada rodamiento debería tener su propio punto de prueba. En las máquinas sensibles a los daños en los rodamientos y en las que los problemas de rodamientos se deberían detectar lo más temprano posible, cada rodamiento debería tener su propio punto de prueba.

Orientación de los Sensores de Vibración

En cualquier programa de monitoreo de máquinas, el hecho que los datos sean recopilados de manera exactamente igual cada vez que se hace una medición es extremadamente importante. Eso para asegurar que los datos se pueden repetir y que se pueda establecer una tendencia en el tiempo. Por esa razón no se recomienda el uso de transductores manuales. Los datos más confiables se recopilan cuando el transductor está montado con botón en la superficie de la máquina.

Mediciones Triaxiales

Para ayudar en la determinación de problema de máquinas es muy útil obtener datos de vibración de cada punto de medición en tres direcciones. Estas direcciones se llaman Axial, Radial y Tangencial. Axial es la dirección paralela a la flecha, radial es la dirección desde el transductor hacia el centro de la flecha, y tangencial es 90 grados de radial, tangente a la flecha.

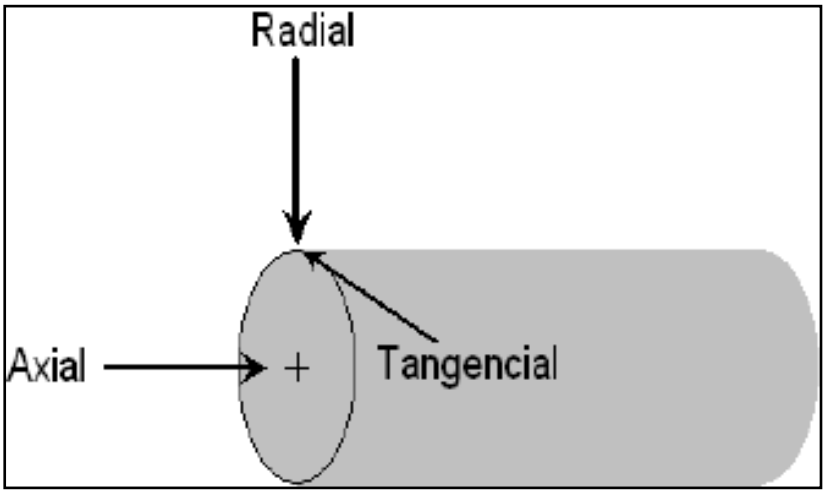


Figura 3.20 Alineación de ejes de vibración

Con los recopiladores de datos de vibración, se recopilan los datos con un acelerómetro triaxial a 3 canales. Realmente son 3 transductores en un cárter y están orientados en las tres direcciones, ortogonales llamadas radial, tangencial y axial. El transductor esta montado por medio de un tornillo o casquillo en un cojín de montaje de bronce especialmente diseñado. El diseño del cojín asegura que el sensor estará orientado en la misma dirección. Los canales 1,2 y 3 del sensor pueden estar a diferentes ejes de medición con respecto a la máquina. Por ejemplo: si el sensor está montado encima de un cárter de rodamiento de una flecha horizontal, el canal 1 sería orientado verticalmente, el canal 2 sería orientado horizontalmente a 90 grados al eje de la flecha, y el canal 3 podría ser orientado horizontalmente paralelo al eje de la flecha. Estas direcciones se llaman Radial, Tangencial y Axial, respectivamente. El archivo inicial de la máquina usa la abreviación RTA para este tipo de montaje. Si el sensor giraría 90 grados alrededor de su eje

vertical, la orientación se llamaría RAT. Es muy importante que el programa conozca la orientación exacta del sensor.

Ejemplos de orientación

El diagrama siguiente enseña las seis orientaciones del sensor para una máquina original.

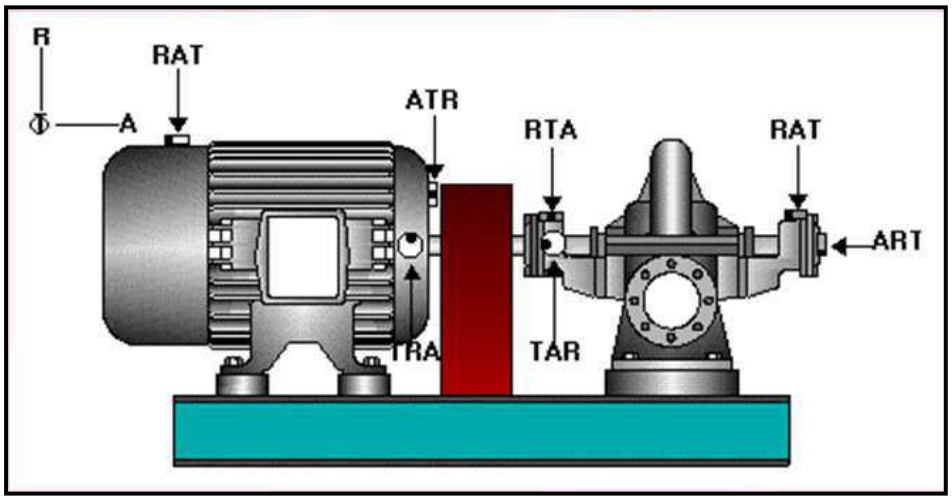


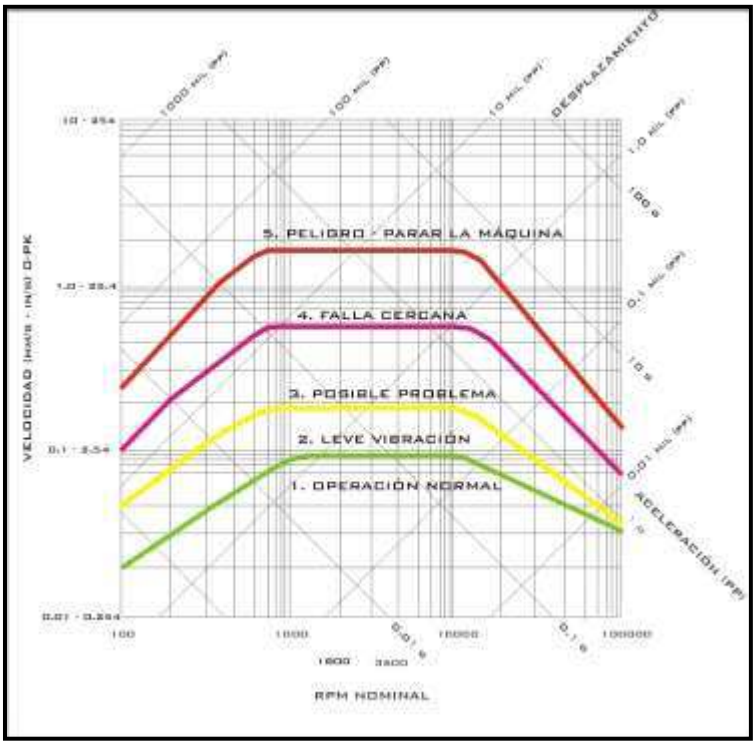
Figura 3.21 Ejes de medición

3.4.4 Configuración de alarmas de nivel y de tendencia

ALARMAS DE NIVEL:

Antes de entrar a realizar un diagnóstico con la ayuda de las patologías vistas anteriormente, es necesario observar los niveles de vibración que presenta cada uno de los puntos de la máquina. Muchas veces los espectros de vibración pueden presentar picos especiales, pero esto no significa que haya una característica de falla, ya que la máquina puede estar operando a condiciones normales dentro de los niveles establecidos por la norma. El problema se presenta cuando estos picos comienzan a aumentar su nivel y de esta manera incrementan el overall del punto.

Existen algunas normas internacionales que proponen unos



estándares generales para varios tipos de máquinas y niveles de alarma. Estos niveles pueden aplicarse a una gran cantidad de máquinas, pero hay excepciones que exigen estudiar otras herramientas para poder llegar a una conclusión del estado de máquina.

Existe una gráfica logarítmica que muestra valores de aceleración, velocidad y desplazamiento frente a una frecuencia específica. Dicha gráfica contiene niveles generalizados de alarma.
Para aplicarlos a diferentes máquinas se hace necesario revisar varias características presentadas en ellas, como son su tamaño y su cimentación; de acuerdo a ello, se escoge un factor de servicio. En la tabla 5 mostrada mas adelante, se presentan valores tentativos de los factores de servicio de estas máquinas.

Un ejemplo de norma de rangos de severidad de vibración es la ISO 2372 la cual ejemplifica límites de los factores de servicio para cuatro tipos de máquina. Como ya se dijo anteriormente, estos límites pueden ser prácticos para muchas máquinas básicas de proceso, pero es importante considerar la individualidad inherente a cada equipo lo que hace necesario la utilización de otras herramientas tales como el seguimiento de niveles de tendencia y el respectivo historial de mantenimiento.

El valor de severidad de la vibración asociada a un rango de clasificación en particular, depende del tamaño y masa del cuerpo

vibrante, las características del montaje del sistema, la salida y el uso que se le da a la máquina. De esta forma es necesario tomar cuenta de varios propósitos y circunstancias concernientes a los diferentes rangos.

TABLA 5

RANGOS DE SEVERIDAD DE VIBRACIÓN PARA MÁQUINAS PEQUEÑAS (CLASE I), MÁQUINAS DE TAMAÑO MEDIANO (CLASE II), GRANDES MÁQUINAS (CLASE III), Y TURBOMÁQUINAS (CLASE IV).

RANGO DE SEVERIDAD DE VIBRACIÓN		**CLASES DE MÁQUINAS**			
Velocidad RMS (mm/s)	Velocidad O-PK (mm/s)	CLASE I	CLASE II	CLASE III	CLASE IV
0.28	0.3960	A	A	A	A
0.45	0.6364				
0.71	1,0041				
1.12	1,5839	B			
1.8	2,5456		B		
2.8	3,9598	C		B	
4.5	6,3640		C		B
7.1	10,0409	D		C	
11.2	15,8392		D		C
18	25,4558			D	
28	39,5980				D
45	63,6396				
71	100,4092				
FSM para las máquinas		1,57020	1	0,62608	0,39625
FSN para los niveles (1/FSM)		0,63686	1	1,59725	2,52364

Nota:

FSM: factor de servicio para las clases de máquinas.
FSN: factor de servicio para los niveles.

La anterior es una de las clasificaciones recomendadas para la escogencia del factor de servicio de una máquina.
Pero como se ha dicho no está dada para todas las aplicaciones y por lo tanto puede sustituirse de acuerdo a situaciones particulares que se presenten. El significado de estas clases se presenta a continuación:

CLASE I: Partes individuales que se conectan a una máquina en operación normal. (Los motores eléctricos que no pasan de 15 kW son ejemplos típicos de esta categoría).

CLASE II: Máquinas de tamaño medio (generalmente motores de 15 a 75 kW de salida), sin cimientos especiales, o máquinas rígidas (por encima de 300 kW) montadas sobre cimientos especiales.

CLASE III: Grandes motores y otras máquinas con grandes masas rotantes montadas sobre cimientos rígidos y pesados, los cuales son relativamente duros en la dirección de medida de vibración.

CLASE IV: Grandes motores y otras máquinas con grandes masas rotantes montadas en cimientos relativamente flexibles en

la dirección de la medida de vibración (por ejemplo, un turbogenerador, especialmente aquellos con subestructuras ligeras).
Fuera de estas clases, también existen otras dos que se dan para maquinaria extremadamente robusta o especial que necesita factores de servicio aun más grandes.

CLASE V: Máquinas y sistemas de conducción mecánica con esfuerzos de desbalanceo inerciales (debido a partes reciprocantes) montadas sobre cimientos, los cuales son relativamente rígidos en la dirección de la medida de vibración.

CLASE VI: Máquinas y sistemas de conducción mecánica con esfuerzos de desbalanceo inerciales (debido a partes reciprocantes) montadas sobre cimientos, los cuales son relativamente suaves en la dirección de la medida de vibración; también pertenecen máquinas con rotación de masas flojas acopladas, tal como golpeteo de eje en un molino; máquinas centrífugas con desbalanceo variable capaces de operar sin componentes conectados; pantallas de vibración, máquinas de prueba de fatiga dinámica y excitadores de vibración usados en plantas de proceso.

NIVELES DE TENDENCIA:

La tendencia se puede definir como una representación gráfica de alguna variable respecto al tiempo. Para nuestro caso, la variable es el nivel general de vibración de los puntos de una máquina.

En esta gráfica puede observarse la pendiente de los puntos a través de su historia. Siempre y cuando la pendiente sea suave, la tendencia permanecerá estable. Pero si llega a presentarse un crecimiento grande, acercándose a una elevación exponencial, en la mayoría de casos es porque se acerca una falla física de la máquina.

Los niveles de vibración a través de la historia de la máquina variarán entre períodos. Esto se debe a que el nivel de vibración es inferido a través de promedios. Esto será normal siempre y cuando no haya un cambio abrupto en el nivel de vibración de manera que la pendiente se incremente considerablemente.

La figura 3.22 presenta la tendencia de un soplador. Hasta la medición del día 330 la tendencia es estable, sin embargo a partir de esta medición los niveles de vibración se incrementan abruptamente. A través del monitoreo de vibraciones se pudo predecir el mal estado de un rodamiento en la polea conducida del soplador, lo cual podría haber producido un paro súbito de la máquina.

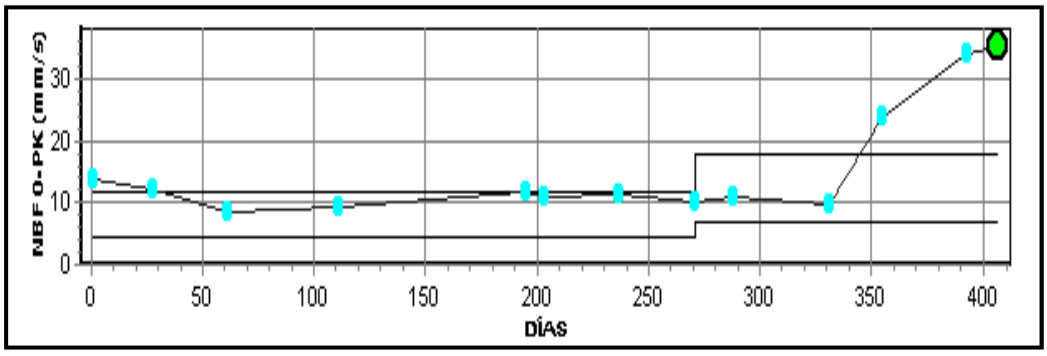


Figura 3.22 Tendencia de un soplador

3.5 Metodología para el análisis y diagnóstico de vibraciones

La metodología para análisis y solución de problemas, en general, es muy variada y suele ser adoptada y adaptada por cada empresa en función de sus peculiaridades.

Haciendo un análisis comparativo de las más habituales, se puede decir que hay dos aspectos fundamentales en los que coinciden:

El recorrido del proceso

El análisis debe centrarse primero en el problema, segundo en la causa y tercero en la solución.

La metodología a utilizar

Las condiciones que debe reunir para garantizar su eficacia son:

- Estar bien estructurada, de forma que se desarrolle según un orden lógico.
- Ser rígida, de manera que no dé opción a pasar por alto ninguna etapa fundamental.
- Ser completa, es decir, que cada etapa sea imprescindible por sí misma y como punto de partida para la siguiente.

Teniendo en cuenta estos aspectos fundamentales (el recorrido del proceso y la metodología a utilizar) y las condiciones indicadas anteriormente (tendencia a convivir con los problemas, tendencia a simplificar los problemas y tendencia a centrarse en el problema del día), se propone un método sistemático de análisis de averías, estructurado en cuatro fases y diez etapas o pasos.

FASE A: Concretar el Problema

SELECCIONAR EL SISTEMA.- Se trata de concretar los límites o alcance del sistema (instalación, máquina o dispositivo objeto del análisis). Se persigue con ello evitar dos errores frecuentes:

a) Ignorar elementos importantes involucrados en el problema, como pueden ser los dispositivos de seguridad y/o control de una máquina o instalación.

b) Extender el análisis a elementos poco relacionados con el problema que pueden hacer excesivamente largo y laborioso el análisis y que, en todo caso, serían objeto de otro análisis.

Seleccionar el sistema supone:

- Establecer los límites del sistema. El análisis se puede efectuar indistintamente a un componente, un subsistema elemental o al sistema completo, pero deben quedar claramente establecidos los límites del sistema analizado.
- Recopilar la información referente al sistema: sus funciones, sus características técnicas y las prestaciones deseadas.

SELECCIONAR EL PROBLEMA.- Normalmente, se trata de una falla o de la consecuencia de la misma.
Se debe tratar de un hecho concreto que responde a la pregunta: ¿qué ocurre? Se persigue concretar un problema de máxima prioridad y evitar la tendencia frecuente a intentar resolver múltiples problemas a la vez, con la consiguiente pérdida de eficacia.

Seleccionar el problema supone:

- Concretar la avería objeto del análisis.
- Describir la avería, lo más completamente posible: ¿qué ocurre?, ¿dónde ocurre?, ¿cómo ocurre?, ¿cuándo ocurre o cuándo comenzó?, ¿quién la provoca? y ¿cómo se ha venido resolviendo?.

CUANTIFICAR EL PROBLEMA.- Es preciso trabajar con datos: ¿cuánto tiempo hace que existe? ¿Cuántas veces ha sucedido? ¿Cuánto está costando?, para se objetivos y evitar ideas preconcebidas.
Un análisis de averías exhaustivo como el que se está presentando no estaría justificado en todos los casos. Por eso, es importante que la

dirección de la planta establezca unos criterios para desencadenar el análisis cuando se presenten las condiciones predefinidas:

- Cuando la falla ha ocasionado un accidente personal.
- Cuando la falla ha provocado un fuego o pérdida de producción importante.
- Cuando la falla ha provocado un daño medioambiental importante.
- Cuando la falla tiene un costo de reparación superior a una cifra determinada.
- Cuando la falla afecta a una máquina o instalación catalogada como crítica.
- Cuando la combinación frecuencia/ costo o frecuencia/criticada superan los límites establecidos.

FASE B: Determinar las Causas

ENUMERAR LAS CAUSAS.- La causa es el origen inmediato del hecho observado o analizado. Se deben omitir opiniones, juicios, etc. y debe responder a la pregunta: ¿por qué ocurre?.

Pensar que una sola causa es el origen del problema es generalmente simplista y preconcebido. Se trata de esforzarse para encontrar todas las causas posibles y comprobar que realmente inciden sobre el problema.

Se deben contemplar tanto las causas internas como externas del equipo analizado, lo que se podría clasificar como causas físicas y causas latentes o de organización, gestión, etc.

Enumerar las causas supone, por tanto confeccionar un listado exhaustivo de todas las posibles causas involucradas en la falla analizada.

CLASIFICAR Y JERARQUIZAR LAS CAUSAS.- El listado antes obtenido no da información alguna sobre el grado de importancia y relación entre las mismas. Por ello, el paso siguiente antes de trabajar en la solución, es buscar relaciones entre causas que permita agruparlas y concatenarlas. Ello permitirá dar cuenta de que, tal vez, la solución de una de ellas engloba la solución de algunas de las otras.

CUANTIFICAR LAS CAUSAS.- La medición, con datos reales o estimados de la incidencia de cada causa sobre el problema nos va a permitir, en un paso posterior, establecer prioridades. Se trata, por tanto, de tener cuantificado el cien por cien de la incidencia acumulada por las diversas causas.

SELECCIONAR UNA CAUSA.- Se trata de establecer prioridades para encontrar la causa o causas a las que hay que buscar soluciones para que desaparezca la mayor parte del problema. Para ello lo que realmente hacemos es asignar probabilidades para identificar las causas de mayor probabilidad (20% de las causas generan el 80% del problema).

FASE C: Elaborar la Solución

PROPONER Y CUANTIFICAR SOLUCIONES.- Se trata de profundizar en la búsqueda de todas las soluciones viables, cuantificadas en costo, tiempo y recursos, para que el problema desaparezca.

SELECCIONAR Y ELABORAR UNA SOLUCIÓN.- Se trata de seleccionar la solución que resuelva el problema de manera más global (efectiva, rápida y barata). Para ello, se compararan las distintas soluciones estudiadas y se completará un plan de acción para aquellas que finalmente se decida llevar a cabo.

FASE D: Presentar la Propuesta

FORMULAR Y PRESENTAR UNA PROPUESTA DE SOLUCIÓN.- El análisis se completa en esta etapa con la que se pretende informar de las conclusiones y la propuesta que se ha elaborado (plan de acción).
Se debe confeccionar un informe de análisis de averías donde se refleje toda la investigación, análisis, conclusiones y recomendaciones.
Si el problema lo merece y ha sido estudiado por un grupo de trabajo, es posible hacer una presentación a la dirección donde el grupo defiende las soluciones aportadas y responde a las cuestiones que se planteen.

Todo el proceso descrito se debe recoger en un formato que se denomina ficha de análisis de averías.

La ficha de análisis de averías sirve para guiar el análisis y para facilitar la comprensión y lectura del mismo.

La propuesta se debe resumir en un plan de acción donde se reflejan todas las actividades a desarrollar, sus responsables y el calendario previsto, para facilitar el seguimiento del plan.

Existen herramientas aplicables en cada una de las etapas, de las que se presenta más adelante (herramientas para análisis de avería) un resumen de las más utilizadas.

Asimismo, se presenta posteriormente unas notas sencillas pero muy útiles a tener en cuenta para llevar a cabo el análisis de averías y confeccionar el informe correspondiente.

3.5.1 Normativas aplicables

Existen diversas normas que pretenden dar valores admisibles de vibración en diferentes equipos:

ISO 2372, ISO 3945, ambas han sido actualizadas en la ISO 10816, que es la que actualmente se considera al evaluar el estado de las máquinas. La norma consta de seis partes, de las cuales la concerniente a bombas es la tercera y que reproducimos en la siguiente tabla:

TABLA 6

Grupo 3: Bombas con impulsores multipaletas y propulsores separados (flujo axial, centrífugo o mixto) con potencias superiores a 15 kw.

Clase de soporte	Límite de zona	Desplazamiento rms(ums)	Velocidad rms(mm/seg)
Rígido	A/B	18	2,3
	B/C	36	4,5
	C/D	56	7,1
Flexible	A/B	28	3,5
	B/C	56	7,1
	C/D	90	11,0

TABLA 7

Grupo 4: Bombas con impulsores multipaletas y propulsores integrados (flujo axial, centrífugo o mixto) con potencias superiores a 15 kw

Clase de soporte	Límite de zona	Desplazamiento rms(ums)	Velocidad rms(mm/seg)
Rígido	A/B	11	1,4
	B/C	22	2,8
	C/D	36	4,5
Flexible	A/B	18	2,3
	B/C	36	4,5
	C/D	56	7,1

Las condiciones de soporte están determinadas por la relación entre la flexibilidad de la máquina y los cimientos. Si la frecuencia natural más baja de la máquina combinada y el sistema soporte en la dirección de la medición es más alta que su propia frecuencia de excitación (esto es en la mayoría de los casos la frecuencia rotacional) por al menos un 25%, entonces el sistema

soporte puede ser considerado rígido en esa dirección. Todos los otros sistemas soporte pueden ser considerados flexibles.

Y las zonas de evaluación:

Zona A.- Vibraciones de máquinas recién puestas en servicio.
Zona B.- Vibraciones de máquinas consideradas aceptables para un funcionamiento sin restricciones a largo plazo.
Zona C.- Vibraciones de máquinas consideradas insatisfactorias para un funcionamiento contínuo a largo plazo. Generalmente, la máquina puede estar funcionando por un período limitado de tiempo en estas condiciones, hasta que se presente una oportunidad adecuada para una acción de remedio.
Zona D.- Vibraciones de máquinas consideradas suficientemente severas para causar daño a la máquina.

Recordar que los valores de vibración a los que hace referencia son valores globales en rms.
Existen otros estándares como API 610, el “Europump and Hydraulics Institute”, especificaciones del Gobierno de Canadá, etc.

A continuación mostramos los valores dados por “Technical Associates of Charlotte” en función de su experiencia en estos equipos:

TABLA 8

Valores en mm/s RMS

Bombas Centrífugas	Bueno	Aceptable	Alarma 1	Alarma 2
Vertical 3.6 a 6m de alto	5.8	5.8 - 8.9	8.9	13.46
Vertical 2.5 a 3.6m de alto	4.9	4.9 - 7.6	7.6	11.67
Vertical 1.5 a 2.5m de alto	4.0	4.0 - 6.2	6.2	9.42
Vertical 0.0 a 1.5m de alto	3.6	3.6 - 5.3	5.3	8.08
Horizontal de propósito general	3.6	3.6 - 5.3	5.3	8.08
Horizontal de pistones	2.6	2.6 - 4.4	4.4	6.73

Fuente: Technical Associates of Charlotte

A pesar de las normas y recomendaciones publicadas en relación con los valores máximos admisibles de vibración, es aconsejable trabajar en lo que se conoce como “personalización de máquinas”, estableciendo y ajustando continuamente los niveles

de alerta y falla de nuestros equipos en base a los históricos de vibración obtenidos. La alarma uno se determina sumando al nivel promedio, normalmente, tres veces la desviación estándar y la alarma dos incrementando la uno en un 50%.

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS OBTENIDOS POR APLICACIÓN DEL SISTEMA SELECCIONADO EN BOMBAS

4.1 Mejora en el proceso de producción del papel por efectos del análisis de vibración

A partir del año 2003, desde la Implementación del Sistema de Vibración en las bombas, se ve que el proceso ha ido mejorando, debido al trabajo que se viene haciendo, con la inclusión de la técnica análisis de vibración con el único objetivo de mantener los equipos en óptimas condiciones; es decir con este sistema lo que se trata de conseguir es que los equipos sean cien por ciento confiables.

Los resultados, de la implementación del sistema en mención, se reflejan en el aumento de la producción anual en la industria del papel, por lo que dicha técnica hace que las máquinas y equipos alcancen el cien por ciento de eficiencia.

Este proceso de producción va acompañado de la buena práctica del análisis de vibración que desde su implementación viene dando resultados como se muestra en la TABLA 9.

TABLA 9

PRODUCCIÓN ANUAL DE PAPEL (EN TONELADAS MÉTRICAS)

PAPELERA NACIONAL S.A.									
PLAN MAESTRO DE PRODUCCIÓN									
Cantidad Presupuestada									
	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
MOLINO 1	29,408	30,099	28,931	30,858	34,428	31,269	35,947	36,476	39,043
Corrugado Medio	16,741	8,681		18,650	11,906	16,369	26,915	27,164	28,741
Extensible	12,667	14,702	14,815	12,208	9,152	14,900	9,032	9,312	10,302
Test Liner		2,292							
C.Medio Semi-encolado		1,620							
C.Medio con bagazo		2,804	14,116		13,370				
MOLINO 2	51,057	53,831	51,058	52,733	54,265	62,733	69,303	71,087	69,429
Corrugado Medio	29,379	25,862		39,229	20,130	48,367	43,626	45,342	43,783
Test Liner	21,678	12,469	10,540	13,504	15,907	14,366	25,677	25,745	25,646
C.Medio Semi-encolado		4,632			18,228				
C.Medio con bagazo		10,868	40,518						
Total Año:	80,465	83,930	79,989	83,591	88,693	94,002	105,250	107,563	108,472

Fuente: PAPELERA NACIONAL S.A.

Como se puede observar en la Figura 4.1 y 4.2, la producción anual en el Molino 1 y Molino 2, desde el 2003 hasta el año 2009, aumentó considerablemente, debido a la mejora en el proceso de producción por efecto del Análisis de Vibración en el Sistema de Bombeo, lo que hace que los equipos vayan mejorando su vida útil y por lo tanto el proceso sea más confiable.

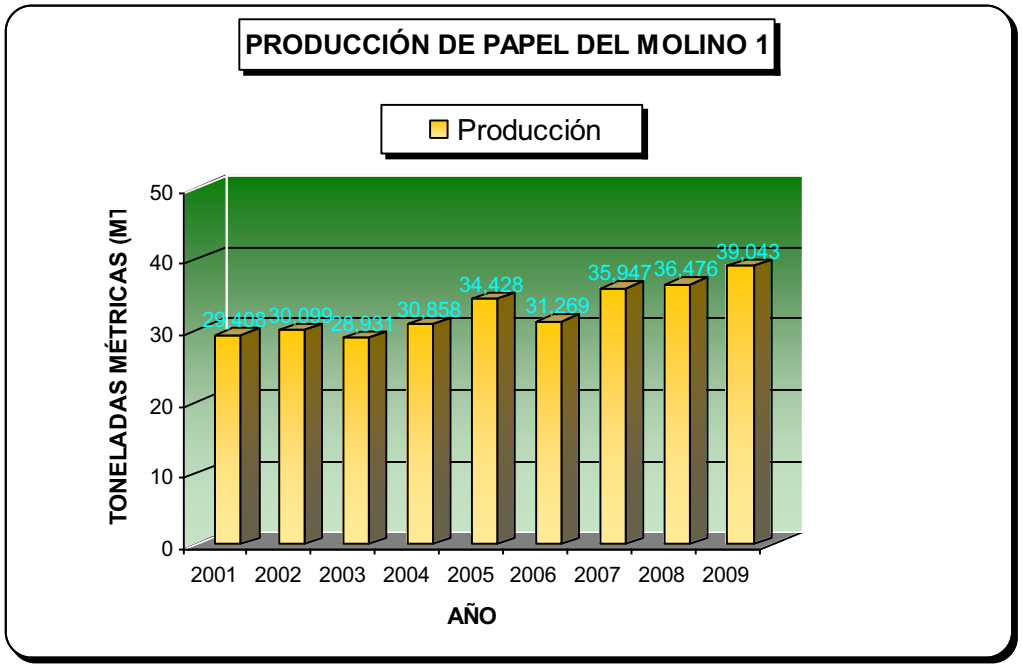


Figura 4.1 Producción de papel del Molino 1

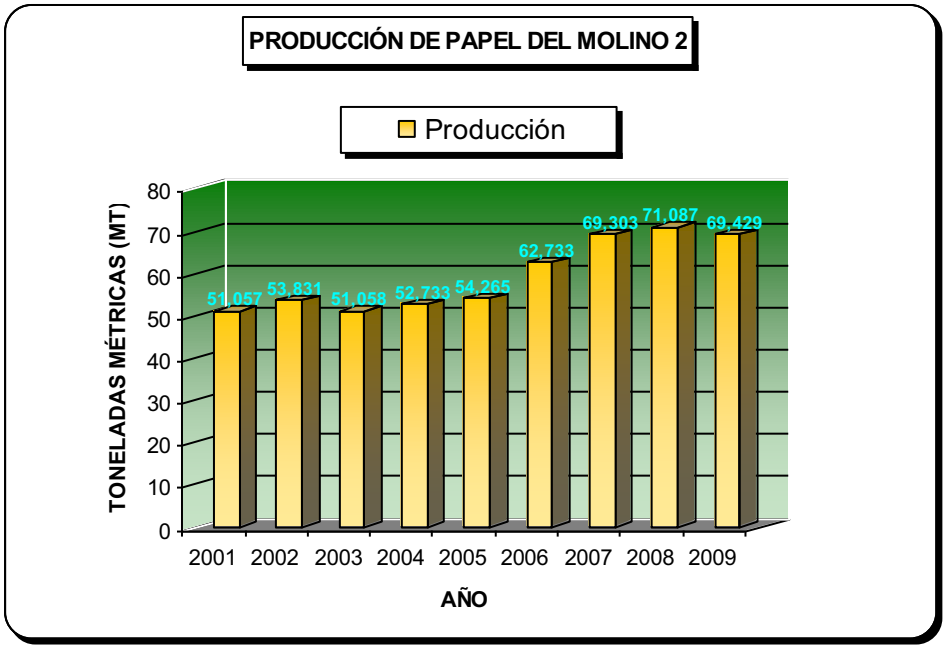


Figura 4.2 Producción de papel del Molino 2

A continuación se presenta en la figura 4.3 la Producción total del Molino 1 y Molino 2 del Proceso de producción, desde el año de la Implementación del Sistema hasta el año 2009, el cual da cuenta que la producción va aumentando en la medida que el análisis de vibración da resultado.

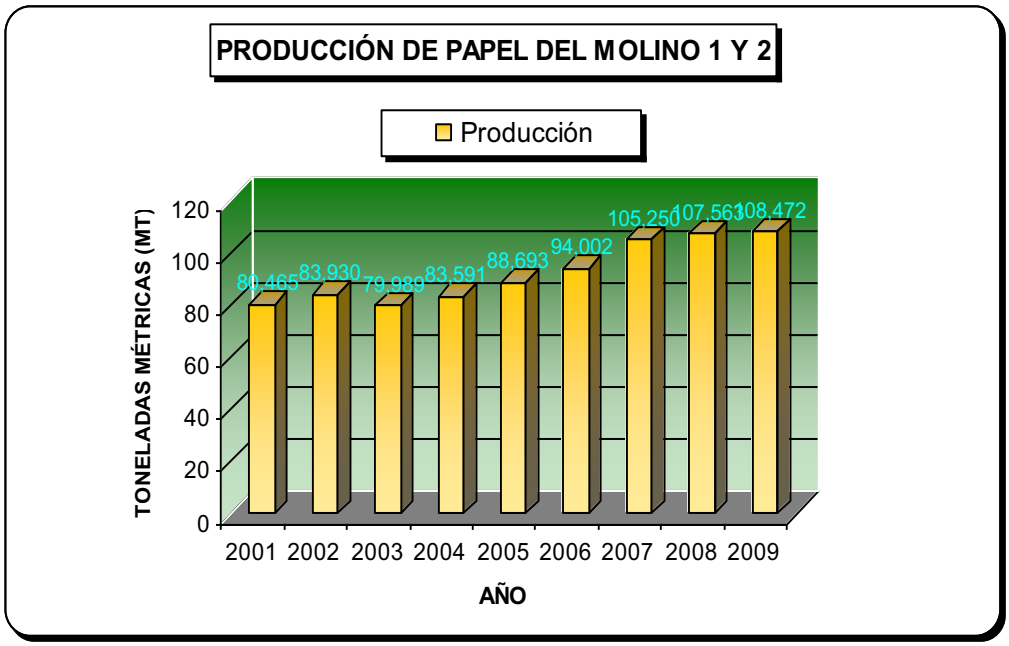


Figura 4.3 Producción de papel del Molino 1 y molino 2

4.2 Análisis de falla de las bombas y paradas no programadas

Una falla se define como un suceso que ocasiona que el sistema de bombeo deje de funcionar de la forma correcta para la cual fue diseñado. En este análisis se presentan los modos de falla, más frecuentes y comunes, en las bombas centrífugas. Las fallas pueden ser de dos clases: ***fallas hidráulicas y fallas mecánicas***. Las fallas hidráulicas se relacionan directamente con el comportamiento del fluido, el cual está determinado por el caudal y la presión que desarrolla la bomba. Por otro lado, las fallas mecánicas están relacionadas directamente con el comportamiento de los elementos mecánicos que

componen el sistema, tales como rodamientos, sellos mecánicos, empaquetaduras, etc.

Un síntoma es una cantidad medible covariable con la condición de estado del sistema de bombeo. Dicho de otra forma, el síntoma es una señal o comportamiento del sistema que permite saber que el sistema tiene problemas. La causa raíz es el origen de la falla o del problema que se está presentando. Es decir, la causa raíz es la razón por la cual el sistema está fallando o está funcionando de manera incorrecta.

Los síntomas y las causas de algunas fallas hidráulicas y mecánicas que aparecen comúnmente en las bombas centrifugas se muestran en la TABLA 9. Dicha tabla es una guía que permite identificar el síntoma y determinar la razón más probable por lo cual se está presentando la falla. Se presentan diez síntomas, cuatro para las fallas hidráulicas y seis para las fallas mecánicas. Estos síntomas se cruzan con una lista de causas. Varios síntomas distintos pueden tener la misma causa raíz, es decir, una misma causa raíz puede ocasionar diferentes tipos de fallas, y estas se pueden manifestar por medio de diferentes tipos de síntomas.

TABLA 9

Síntomas y causas de fallas hidráulicas y mecánicas en las bombas

Síntoma	Fallas Hidráulicas				Fallas Mecánicas					
Causa	Bomba no entrega Liquido	Bomba no entrega suficiente caudal	Bomba no entrega suficiente presión	Bomba entrega flujo intermitente	Rodamientos se recalientan o fallan regularmente	Sellos mecánicos fallan con frecuencia	Empaquetaduras tienen corta vida	Vibraciones de la bomba exceden los niveles normales	Bomba consume mucha potencia	Desgaste acelerado de partes internas
Bomba no preparada o mal preparada	x	x	x	x						
Válvulas de succión y descarga cerradas u obstruidas	x	x	x					x		
Insuficiente NPSH disponible	x	x	x			x		x		X
Excesivo aire atrapado en el fluido	x	x	x	x						
Velocidad (rpm) muy baja	x	x	x							
Rotación incorrecta del impeler		x							x	
Impeler o diámetro del impeler incorrecto		x	x							
Cabeza del sistema muy alta		x								
Instrumentos dan lecturas erróneas		x	x							
Entrada de aire en la línea de succión				x						

Excesivo desaliento del eje					x	x		x		
Lubricación inadecuada					x					
Contaminación del Lubricante					x					
Fuerza axial o cargas radiales mayores que el grado del rodamiento					x					
Mezcla de lubricación inadecuada					x			x		
Presión de succión muy alta					x	x				
Rodamientos instalados incorrectamente					x	x		x		
Impeler desbalanceado					x	x		x		
Sobrecalentamiento de las caras de los sellos						x				
Deflexión excesiva del eje					x	x		x		
Instalación incorrecta de los sellos						x				
La bomba esta funcionando en seco						x				
La bomba funciona fuera del punto de diseño					x	x	x	x	x	
Empaquetaduras instaladas incorrectamente							x			
Impeler bloqueado	x							x		
Bomba operando a velocidad cercana a la frecuencia natural del sistema								x		

Las causas de las fallas que se presentan en las bombas centrífugas pueden pertenecer a otras categorías no consideradas en la TABLA 9, tales como:

- Mal diseño de la bomba

- Materiales defectuosos
- Deficiencias de proceso y fabricación
- Defectos en el ensamble y/o instalación
- Operación fuera del punto de diseño o condiciones de servicio distintas a las recomendadas
- Mantenimiento inadecuado
- Operación inadecuada

El primer paso que debe seguirse en el análisis de fallas en una bomba centrífuga es categorizar la falla o el problema que se está presentando. Este paso es sencillo, pues solo existen dos categorías, las fallas hidráulicas y las fallas mecánicas. Luego se establece cual es el síntoma que se está presentando en el sistema de bombeo. Como se explicó antes, el síntoma es el suceso o el fenómeno físico que indica que en el sistema algo está mal. El tercer paso consiste en determinar cual es el mecanismo de falla. Dicho mecanismo es un proceso físico que conduce a la falla. Este puede ser: fuerza, temperatura, tiempo, reacciones del medio ambiente, etc.

El análisis de falla termina con la identificación de la causa raíz de la falla o del problema que se está presentando en el sistema. Como se indicó antes, la causa es el origen de la falla. Una vez encontrada la causa raíz del problema se debe proceder a corregirla totalmente para que la falla o problema no vuelva a presentarse.

Una carta de identificación de averías típicas en las bombas se presenta en el **Apéndice H**. Dicha carta presenta para cada problema o falla, las

posibles causas y las posibles soluciones. Se puede observar que un problema puede ser ocasionado por una o varias causas, por lo tanto es necesario revisar todas las causas raíces posibles con el fin de dar una solución completa al problema.

A continuación, un ejemplo del análisis de falla que se le hizo a una bomba del Sistema de Bombeo en Papelera Nacional. Presenta calentamiento extremos en la botella de la Bomba P05 del molino2, salida del retenedor lado acople de la bomba, permitiendo la salida del lubricante y falla de rodamientos.

ANÁLISIS DE FALLA.

Haciendo las investigaciones de la falla y parada no programada que causo la bomba de los limpiadores uniflow primarios se encuentra lo siguiente:

Criterio Nº 1.- Según las versiones de los mecánicos interventores de la máquina en esa noche y que encontraron al rojo vivo la botella de la mencionada bomba, además el retenedor del lado del acople salido, lo que pudo haber ocurrido la salida del lubricante de la bomba quedando la misma sin lubricación, que según nuestros criterios con ausencia de lubricante aumenta la temperatura por fricciones de los elementos mecánicos. En este caso los elementos rodantes de los rodamientos aceleraron los niveles de temperatura al máximo.

No se puede decir apresuradamente que la botella se quedó sin lubricante, porque en la inspección realizada a los rodamientos se

encuentra evidencias de una lubricación adecuada, como se muestra en la figura 4.4, esta observación también lo confirma el inspector mecánico y el personal de lubricación del molino, que en la mañana de ese día realizó las rutas normales de lubricación, el cual verificó el nivel normal del lubricante.

Figura 4.4 Rodamiento lado impulsor.

Criterio Nº 2.- En la inspección minuciosa realizada al rodamiento de lado del acople se observa lo siguiente:

- Deformación de la pista interior por calentamiento excesivo
- Formación de canal profundo en la pista exterior por cargas axiales severas
- Salida del retenedor de su posición normal
- Deformación severas de los elementos rodantes
- Deformación de canastillas guías de los rodamientos por calentamiento excesivo

Lo resaltante de esta falla es la evidencia de canales excesivo en la pista del rodamiento 7222 lado del acople, lo que nos permite pronosticar que en la unidad están existiendo cargas axiales muy elevadas que el rodamiento no puede soportar. En la Figura 4.5, se muestra la formación de canal con movimiento del material de la pista en la dirección de rotación del rodamiento, lo mismo se observa con más claridad de movimiento de material en la pista interior, en la rodadura propia de las bolillas del rodamiento.

Figura 4.5 Pista exterior del rodamiento lado del acople.

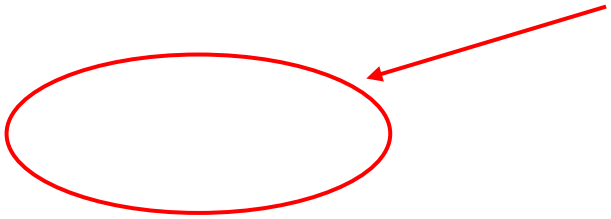


Figura 4.6 Pista interior del rodamiento lado acople

El color rojizo que se observa en la figura 4.6, es por las altas temperaturas que adquirió la bomba. Alcanzó aun la deformación plástica de algunos materiales especialmente la pista interior del rodamiento. Ver figura 4.7.

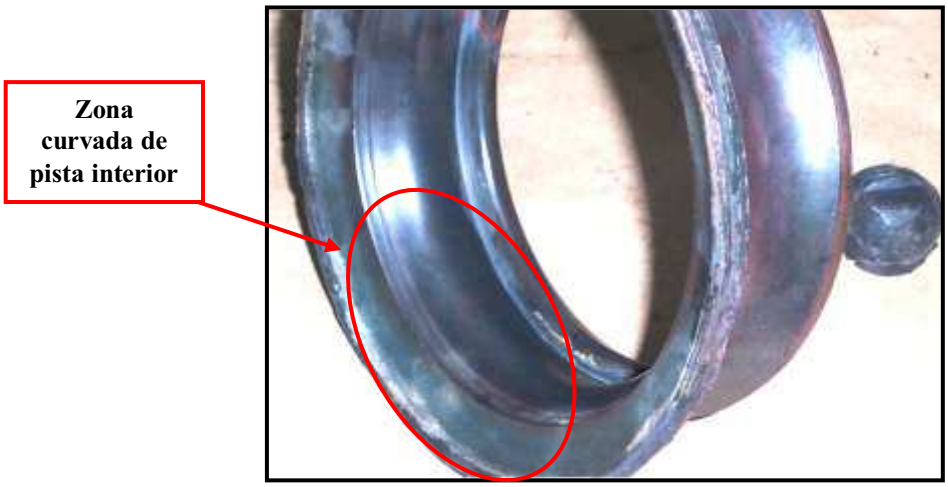


Figura 4.7 Pista interior curvada del rodamiento

La zona encerrada con la elipse, es la zona donde se encuentra curvada la pista interior del rodamiento que no es localizada sino en toda su periferia.

En las demás fotografías tomadas del rodamiento, se pueden observar daños severos en los elementos rodantes y canastilla, los mismos que alcanzando niveles de temperatura elevados perdieron su resistencia, lo que llevó a la deformación que se muestra en la figura 4.8

Figura 4.8 Elementos rodantes y canastilla del rodamiento 7222

De acuerdo a lo observado en el ejemplo de la falla en la Bomba P05 los ingenieros de mantenimiento pudieron concluir lo siguiente:

1. Que están existiendo cargas axiales severas intermitentes, que provocan este tipo de falla en los rodamientos de la bomba por sobrecargados.

2. Se ha solicitado la asistencia de los representantes de SKF, y se enviará muestras del rodamiento fallado, para que emitan sus criterios.
3. Se recomienda capacitar al personal asignado por la subgerencia técnica en el análisis de falla de materiales.

Paradas no programadas:

Las paradas no programadas, en el Sistema de Bombeo de la Industria Papelera son ocurridas por los siguientes modos de falla que se describen a continuación:

Modos de fallo en bombas:

1. Desgaste de rodamientos
2. Holgura de rodamiento
3. Rodamientos desalineados
4. Rodamiento de empuje averiado
5. Impulsor desbalanceado
6. Pata floja
7. Flexibilidad transversal de bomba
8. Incrustaciones en la carcasa
9. Cavitación o turbulencia

A continuación se describe de manera mas detallada los espectros característicos de cada Modo de Falla que nos dará una mejor visión del porqué fallan las Bombas.

DESBALANCEO:

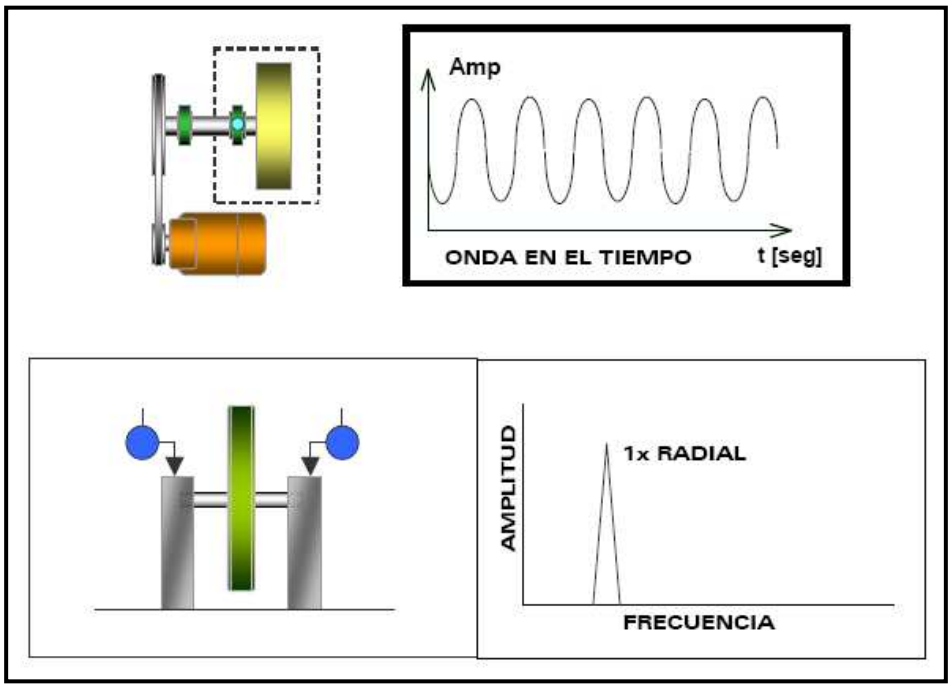


Figura 4.9 Espectro de Desbalanceo Estático

El desbalance estático es producido generalmente por desgaste radial superficial no uniforme en rotores en los cuales su largo es despreciable en comparación con su diámetro.

El espectro presenta vibración dominante con una frecuencia igual a 1 X RPS del rotor como se muestra en la figura 4.9.

Se recomienda para corregir la falla balancear el rotor en un sólo plano (en el centro de gravedad del rotor) con la masa adecuada y en la posición angular calculada con un equipo de balanceo.

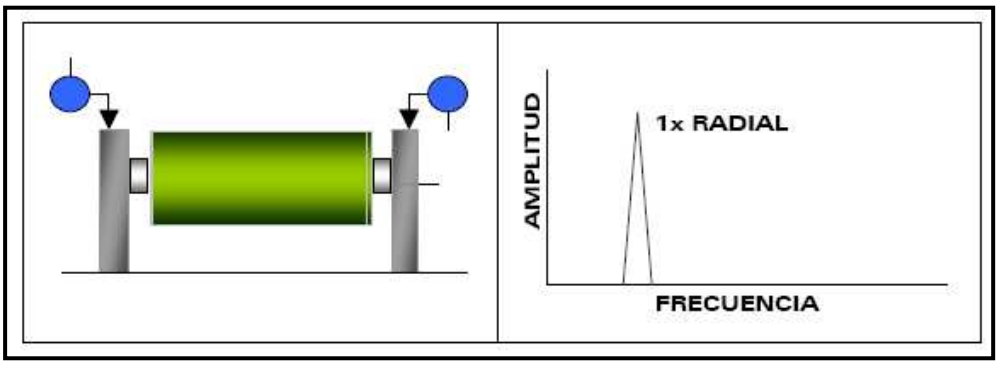


Figura 4.10 Desbalanceo Dinámico

El desbalanceo dinámico ocurre en rotores medianos y largos. Es debido principalmente a desgastes radiales y axiales simultáneos en la superficie del rotor.

El espectro presenta vibración dominante y vaivén simultáneo a frecuencia igual a 1 X RPS del rotor como se muestra en la figura 4.10.

Se recomienda para corregir la falla balancear el rotor en DOS PLANOS con las masas adecuadas y en las posiciones angulares calculadas con un equipo de balanceo dinámico.

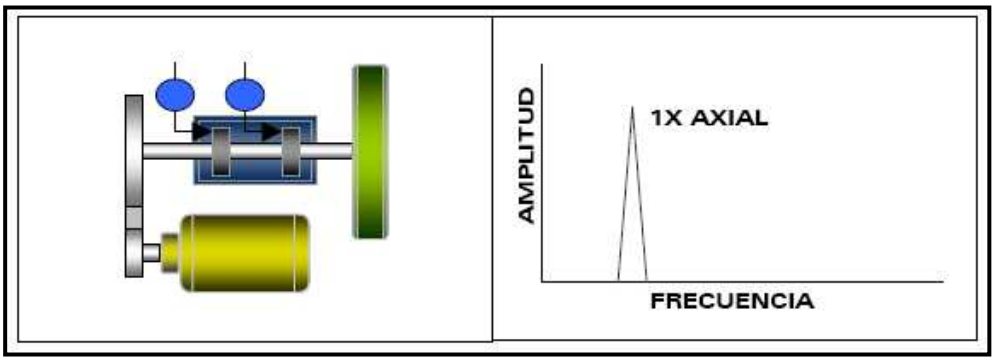


Figura 4.11 Desbalanceo en Rotor Colgante

En el desalineamiento en el rotor colgante ocurre en rotores que se encuentran en el extremo de un eje .Es producido por desgaste en la superficie del rotor y doblamiento del eje.

El espectro presenta vibración dominante a 1X RPS del rotor, muy notoria en dirección AXIAL y RADIAL como se muestra en la Fig. 4.11.

Para corregir la falla, primero debe verificarse que el rotor NO TENGA EXCENTRICIDAD NI QUE EL EJE ESTÉ DOBLADO. Luego debe realizarse el balanceo adecuado.

DESALINEAMIENTO:

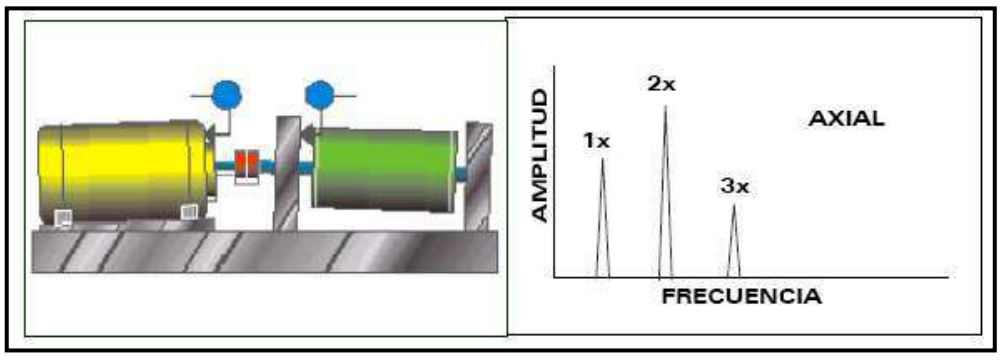


Figura 4.12 Desalineamiento Angular

El desalineamiento angular ocurre cuando el eje del motor y el eje conducido unidos en el acople, no son paralelos como se muestra en la figura 4.12.

Caracterizado por altas vibraciones axiales 1X RPS y 2X RPS son las más comunes, con desfase de 180 grados a través del acople. También se presenta 3X RPS. Estos síntomas también indican problemas en el acople.

Para corregirlo, el conjunto motor-rotor debe alinearse, pero empleando un equipo de alineación adecuado.

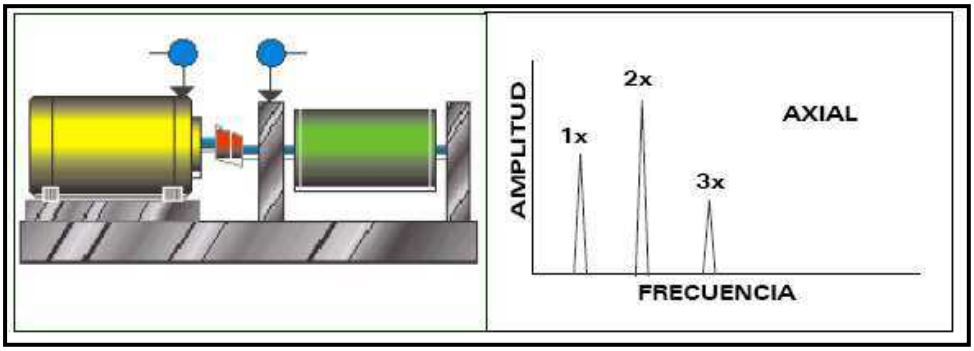


Figura 4.13 Desalineamiento Paralela

En el desalineamiento paralelo de los ejes del motor y del rotor conducido están paralelos, pero no son colineales como se muestra en la figura 4.13.

Se pueden detectar altas vibraciones radiales a 2X RPS, predominante, y a 1X RPS, con desfase de 180 grados a través del acople. Cuando aumenta la severidad, genera picos en armónicos superiores (4X , 8X).

Se debe alinear el conjunto para corregir el daño, pero empleando un equipo de alineación adecuado.

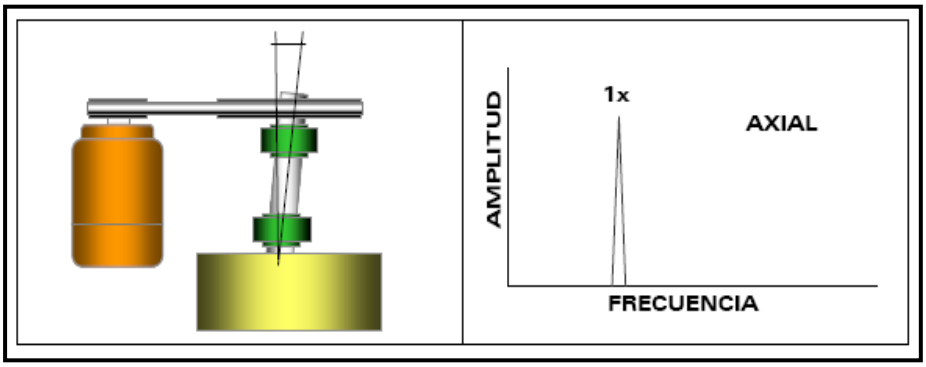


Figura 4.14 Desalineamiento entre Chumaceras

En una máquina con transmisión de poleas, la mala posición de las chumaceras puede evitar que el eje se acomode correctamente, lo cual genera vibraciones anormales en sentido axial y radial.

Excitación del pico representativo de la velocidad (1X RPS), especialmente en sentido axial como se muestra en la figura 4.14.

Es necesario hacer una verificación de que las chumaceras queden completamente paralelas entre si.

HOLGURA MECÁNICA:

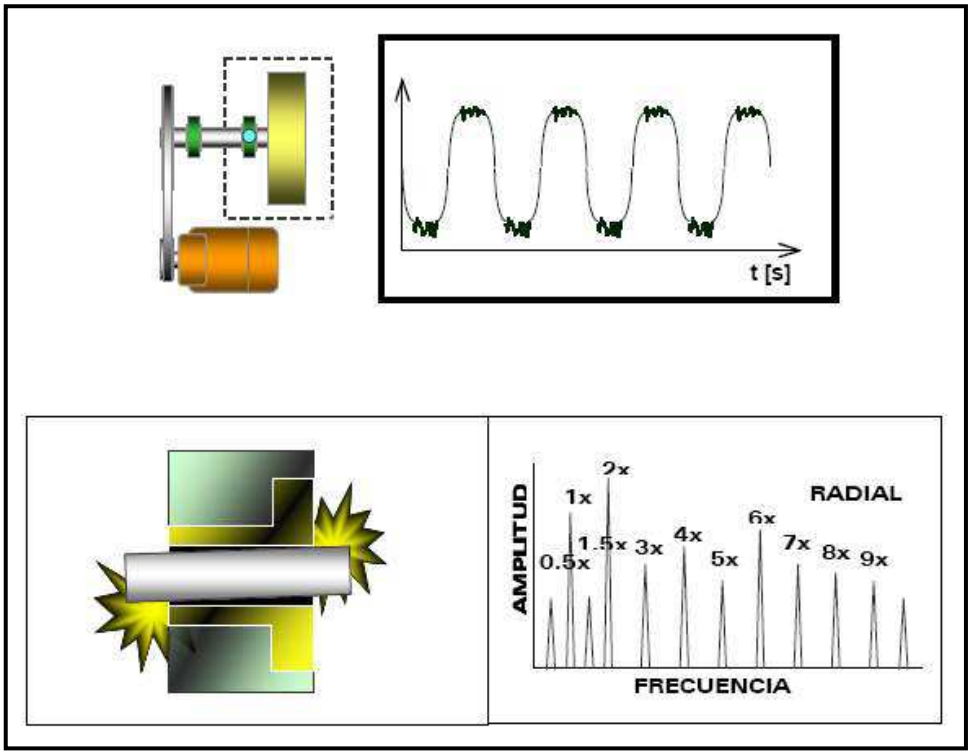


Figura 4.15. Holgura Eje – Agujero

Aflojamiento de manguitos, tolerancias de manufactura inadecuadas (con juego), y holgura entre el impulsor y su eje en bombas. Causa un truncamiento en la forma de onda en el dominio del tiempo.

La falla genera múltiples armónicos y subarmónicos de 1X RPS, destacándose los armónicos fraccionarios 1/2 X, 1/3 X, 1.5 X, 2.5 X,...como se muestra en la figura 4.15. Frecuentemente la fase es inestable y el nivel máximo tiende a una dirección notable realizando lecturas radiales espaciadas 30 grados entre si.

Se recomienda verificar la colocación de los manguitos y los juegos eje-agujero cercano al punto de medición. Igualmente, los ajustes de rotor-eje.

SOLTURA ESTRUCTURAL (PATA FLOJA):

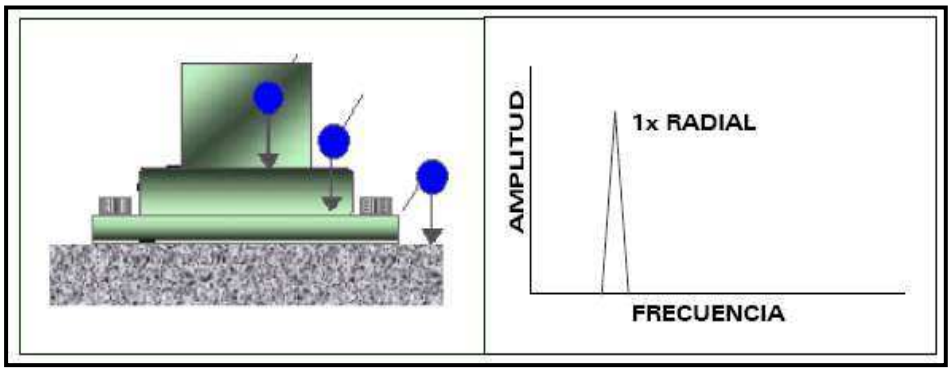


Figura 4.16. Soltura Estructural

Ablandamiento o desplazamiento del pié de la máquina, por holgura en los pernos de la base o por deterioro de los componentes de la sujeción.
El espectro presenta vibración a 1X RPS en la base de la máquina con desfase a 180 grados entre los elementos sujetados en el anclaje como se muestra en la figura 4.16. Altamente direccional en la dirección de la sujeción.
Se recomienda primero revisar el estado de fatiga del pie de máquina (rajaduras, corrosión). Luego debe verificarse el estado de los sujetadores y por último el estado de la cimentación.

FLUJO DE LÍQUIDOS:

Frecuencia a la cual, cada aspa pasa por un punto de la carcaza. Producida por obstrucciones, cambios abruptos de direcciones o desgastes de juntas.

La BPF (frecuencia de paso de aspas) es excitada en sus primeros dos armónicos con bandeamientos laterales. La BFP es igual al número de aspas por la frecuencia. La BPF algunas veces coincide con la frecuencia natural lo cual causa altas vibraciones.

En caso de aumentos en la BFP deben revisarse cambios abruptos de dirección del fluido y posibles obstrucciones parciales en la descarga de la bomba como se muestra en la figura 4.17.

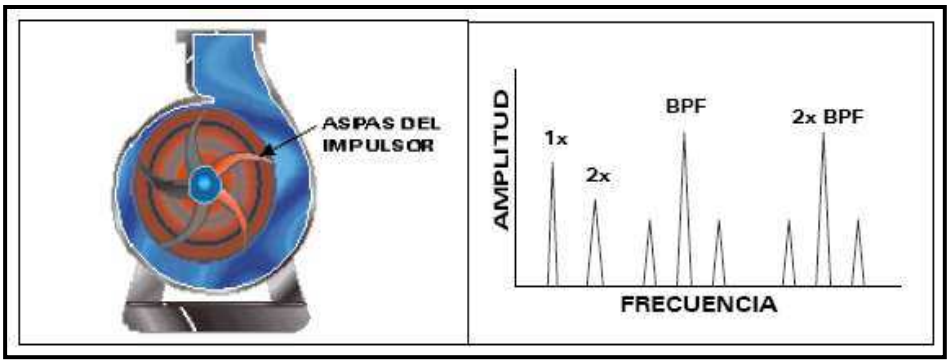


Figura 4.17 Frecuencia de aspas

Es la entrada de aire o vaporización de un fluido dentro de la bomba. Ocurre cuando la presión de fluido es menor que la presión de vapor a esta temperatura. La cavitación causará erosión a las partes internas de la bomba.

El espectro muestra una vibración caótica que se presenta a altas frecuencias (del orden de 2000 Hz) como se muestra en la figura 4.18 Para solucionar el problema debe controlarse con más rigor la presión de succión y tener cuidado con el proceso para cebar la bomba.

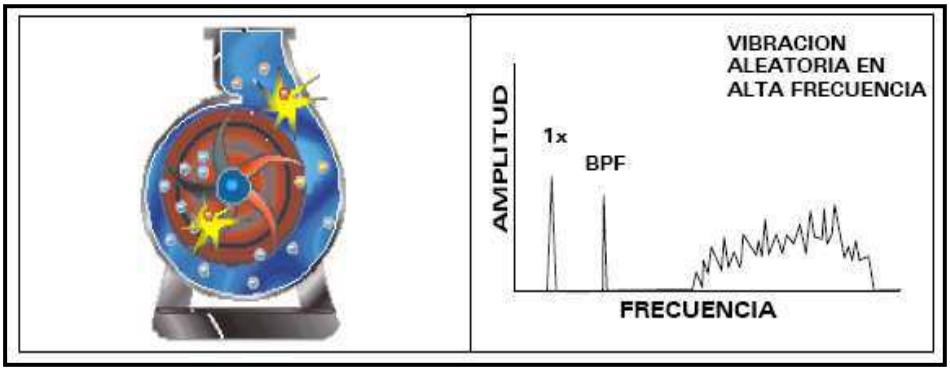


Figura 4.18 Cavitación

FALLA EN RODAMIENTOS:

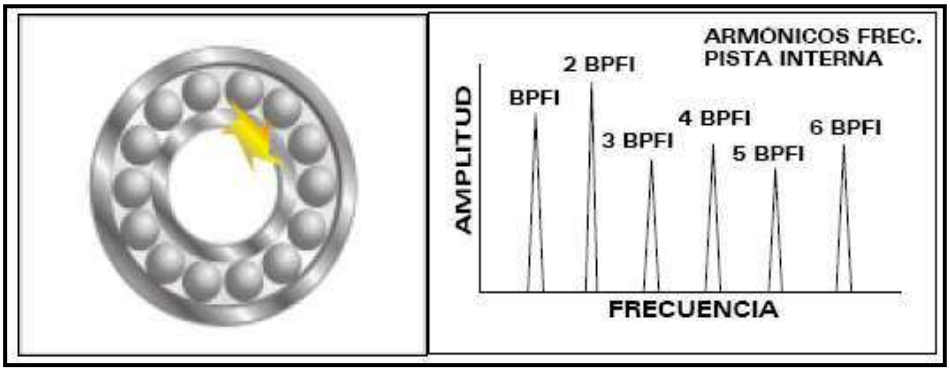


Figura 4.19 Falla en pista interna

Agrietamiento o desastillamiento del material en la pista interna, producido por errores de ensamble, esfuerzos anormales, corrosión, partículas externas o lubricación deficiente.

Se produce una serie de armónicos siendo los picos predominantes 1X y 2X RPS la frecuencia de falla de la pista interna, en dirección radial. Además el contacto metal - metal entre los elementos rodantes y las pistas producen pulsos en el dominio del tiempo del orden de 1-10 KHz como se muestra en la figura 4.19.

El rodamiento debe ser reemplazado, debido a que la falla seguirá incrementándose. Antes revise el estado de lubricación del rodamiento.

Nota: Generalmente la medida más confiable es en dirección de la carga.

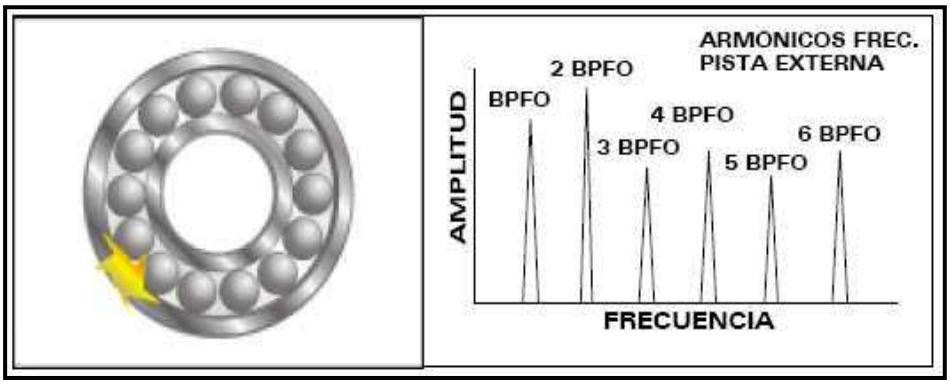


Figura 4.20 Falla en pista externa

Agrietamiento o desastillamiento del material en la pista externa, producido por errores de ensamble, esfuerzos anormales, corrosión, partículas externas o lubricación deficiente.

Se produce una serie de armónicos siendo los picos predominantes 1X y 2X RPS la frecuencia de falla de la pista externa, en dirección radial. Además el contacto metal - metal entre los elementos rodantes y las pistas producen pulsos en el dominio del tiempo del orden de 1-10 KHz como se muestra en la figura 4.20.

El rodamiento debe ser reemplazado, debido a que la falla seguirá incrementándose. Antes revise el estado de lubricación del rodamiento.

Nota: Generalmente la medida más confiable es en dirección de la carga.

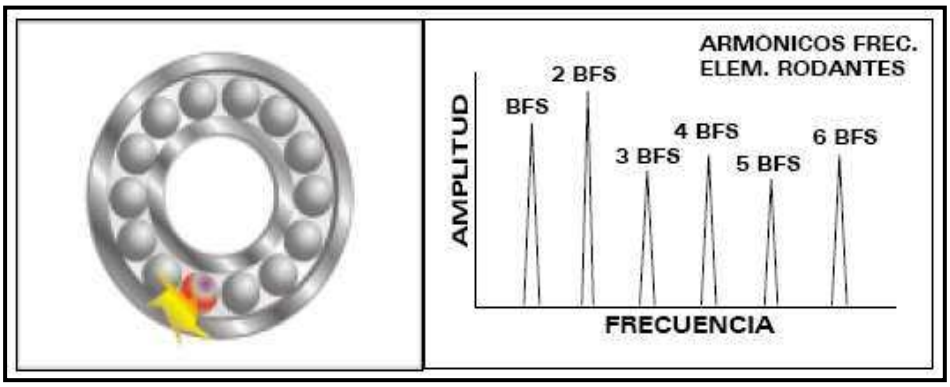


Figura 4.21 Falla en elementos rodantes

Agrietamiento o desastillamiento del material en los elementos rodantes, producido por errores de ensamble, esfuerzos anormales, corrosión, partículas externas o lubricación deficiente.

Se produce una serie de armónicos siendo los picos predominantes 1X y 2X RPS la frecuencia de falla de los elementos rodantes, en dirección radial. Además el contacto metal – metal entre los elementos rodantes y las pistas producen pulsos en el dominio del tiempo del orden de 1-10 KHz como se muestra en la figura 4.21.

El rodamiento debe ser reemplazado, debido a que la falla seguirá incrementándose. Antes se revisa el estado de lubricación del rodamiento.

Nota: Generalmente la medida más confiable es en dirección de la carga.

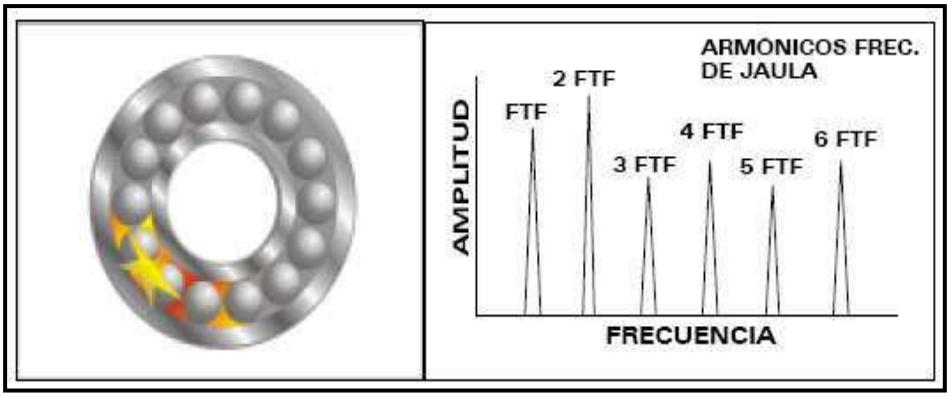


Figura 4.22 Deterioro de la Jaula

Deformación de la jaula, caja o cubierta que mantiene en su posición a los elementos rodantes.

Se produce una serie de armónicos de la frecuencia de la jaula siendo los picos predominantes 1X y 2X RPS de la frecuencia de falla en jaula, en dirección radial o axial como se muestra en la figura 4.22.

El rodamiento debe ser reemplazado, debido a que la falla seguirá incrementándose. Se debe revisar la posible causa que está dando origen a la falla.

4.3 Incremento de la disponibilidad de operación en el Sistema de Bombeo

La disponibilidad operacional representa el porcentaje de tiempo que el equipo queda a disponibilidad del área de operación para desempeñar su función en un período de análisis. Teniendo en cuenta que el equipo está fuera de operación por paros programados y no programados. El objetivo de este indicador es medir el desempeño de los equipos y la eficiencia en la gestión de mantenimiento, de manera conjunta, comparándolos contra los objetivos y metas de la empresa , con la finalidad que la operación tenga cada vez más tiempo el equipo disponible y que éste pueda realizar la función para la que fue diseñado.

La Disponibilidad se la determina con la siguiente fórmula que se muestra a continuación:

$$\% \text{ Disp} = [\text{ TTDP} – (\text{ TPPP} + \text{TPCP} + \text{THPF})] / \text{TTDP} X\ 100$$

Donde:

TTDP : Tiempo total disponible del período

TPPP : Tiempo de paros preventivos programados

TPCP : Tiempo de paros correctivos programados

THPF : Tiempo de horas de paro por fallas

Para el análisis de la disponibilidad en todas las máquinas o equipos de la Planta el Tiempo Total disponible del período (TTDP) es de 720 horas MENSUALES.

Como se muestra en la figura 4.23 se refleja los resultados antes y después de la implementación del sistema de vibración que la disponibilidad de los equipos del Sistema de Bombeo de la Industria Papelera se ha mantenido en un 99,80 $^{+}_{-}$ 0,1 %.

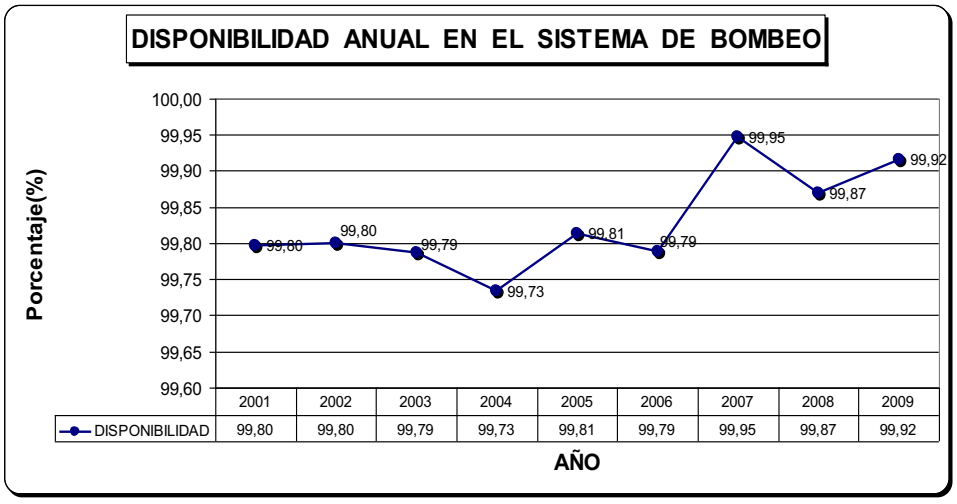


Figura 4.23 Disponibilidad anual en el sistema de bombeo

Estos resultados mostrados en el ejemplo anterior se obtuvieron realizando un estudio a todo el Sistema de Bombeo tanto del Molino 1 como del Molino 2 en la industria Papelera. En primer lugar se hizo un listado de equipos críticos de todas las Bombas tanto de Preparación de Pasta como de Máquina de Papel, así como se muestra en el **Apéndice E**. Luego de esto se hizo el cálculo de la disponibilidad anual para cada equipo dando como resultado que el índice de disponibilidad se mantiene en un 99,80 $^{+}_{-}$ 0,1 % como se muestra a continuación.

TABLA 10

Disponibilidad anual en cada proceso

PROCESO	DISPONIBILIDAD ANUAL (%)								
	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
PREPARACIÓN DE PASTA MOLINO 1	99,78	99,79	99,82	99,52	99,87	99,29	99,94	99,88	99,91
MÁQUINA DE PAPEL MOLINO 1	99,77	99,91	99,80	99,83	99,77	99,89	99,91	99,85	99,91
PREPARACIÓN DE PASTA MOLINO 2	99,75	99,69	99,82	99,87	99,79	99,86	99,97	99,92	99,95
MÁQUINA DE PAPEL MOLINO 2	99,89	99,83	99,71	99,52	99,87	99,74	99,96	99,82	99,88
DISPONIBILIDAD TOTAL	**99,80**	**99,81**	**99,79**	**99,69**	**99,82**	**99,70**	**99,94**	**99,87**	**99,91**

Dentro de este ejemplo de aplicación, el proceso de mayor disponibilidad en el Sistema de Bombeo resultó ser las de Preparación de Pasta del Molino 2 y Maquina de Papel del Molino 1 con un promedio de disponibilidad del 99,85% y luego le sigue la de Máquina de Papel con un 99,80% de disponibilidad dejando al final al proceso de Preparación de pasta del Molino 1 con 99,75%, resultados que no dejan de ser buenos pero siempre habrá que ir mejorando haciendo que los tiempos de paradas vayan disminuyendo.

4.4 Evaluación y estudio de los tiempos improductivos de mantenimiento predictivo en bombas debido a las vibraciones mecánicas

Para evaluar los tiempos de parada en la Industria Papelera, se aplicó el método cuantitativo que se refiere a mostrar los tiempos perdidos por fallas en el sistema de bombeo en la Industria, en un cierto período. Como el Sistema de Mantenimiento Predictivo se implementó en el año 2003, entonces hemos tomado un rango de tiempo desde el 2001 hasta el 2009 para poder ver la tendencia de los tiempos improductivos.

Como se muestra en la figura 4.24, desde el 2001 hasta el 2003 la tendencia de los tiempos perdidos en el Molino 1 y molino 2 es alta y, debido a este aumento, la empresa tomó la decisión de Implementar el Sistema, el cual permitirá que estos tiempos se vayan reduciendo. Es a partir del año 2003, que los tiempos por paradas disminuyeron

gradualmente, lo que hace al Sistema eficiente y beneficioso para la industria.

Otra ventaja de la implementación del sistema es que como los tiempos improductivos disminuyen esto hace que la disponibilidad de los equipos vaya aumentando y el equipo sea más confiable.

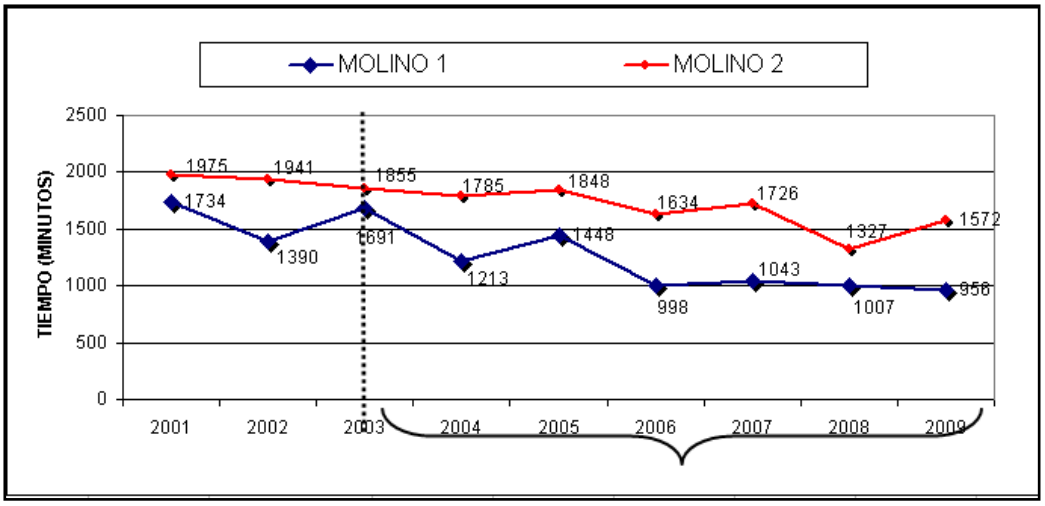


Figura 4.24 Tiempos improductivos desde el 2001 hasta 2009

En el **Apéndice F** se ilustra el formato de cómo se evaluaron los tiempos improductivos que se muestra en la figura 4.24; es decir tanto para el molino 1 como para el molino 2.

Mediante el método cuantitativo se evalúan los datos desde el año 2001 hasta el 2009 de los tiempos improductivos en el Sistema de Bombeo.

Con la ayuda de la figura 4.25, se observó cuales son las causas de peso dentro de este porcentaje de paradas no planeadas; el 80 % se encuentra concentrado entre:

- Armónicos eléctricos
- Daños en los rodamientos
- Desalineamiento
- Holgura mecánica
- Desbalanceo
- Armónicos de paso de alabes

El otro 20% lo componen causas tales como flexibilidad en base de motor, problemas con el impulsor, entre otros.

Con los resultados expuestos en el diagrama de Pareto se busca determinar cuales son las principales causas de las paradas No programadas que se presentan en el Sistema de Bombeo y que conllevan al aumento de los tiempos improductivos.

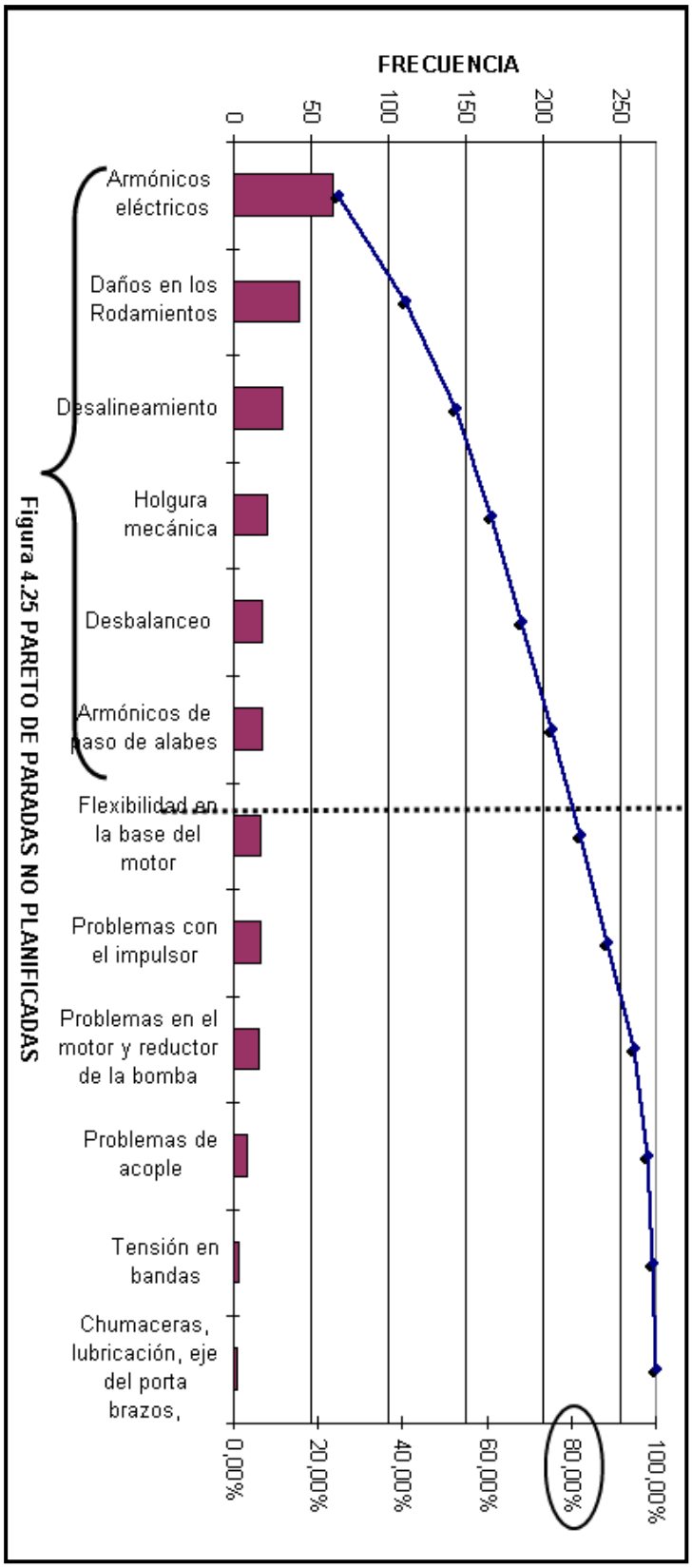


Figura 4.25 PARETO DE PARADAS NO PLANIFICADAS

4.5 Evaluación de la severidad vibratoria en el Sistema de Bombeo

La severidad de vibración se clasifica conforme a los siguientes parámetros:

- Tipo de máquina
- Potencia o altura de eje
- Flexibilidad del sistema soportante

Clasificación de acuerdo al tipo de máquina, Potencia o altura de eje

Las significativas diferencias en el diseño, tipos de descanso y estructuras soportantes de la máquina, requieren una separación de ellas en diferentes grupos. Las máquinas de estos grupos pueden tener eje horizontal, vertical o inclinado y además pueden estar montados en soportes rígidos o flexibles.

GRUPO 1:
Máquinas Rotativas grandes con potencia sobre 300 KW
Máquinas eléctricas con altura de eje H $\geq$ 315 mm

GRUPO 2:
Máquinas Rotativas medianas con potencia entre 15 y 300 KW
Máquinas eléctricas con altura de eje H entre 160mm y 315 mm.

GRUPO 3:

Bombas con Impulsor multipaletas y con motor separado (flujo centrífugo, axial o mixto) con potencia sobre 15 KW

GRUPO 4:

Bombas con Impulsor multipaletas y con motor integrado (flujo centrífugo, axial o mixto) con potencia sobre 15 KW

- La altura de eje H de una máquina está definida como la distancia medida entre la línea de centro del eje y el plano basal de la máquina misma
- La altura de eje H, de una máquina sin patas o de una máquina con pies levantados o cualquier máquina vertical, se debe tomar como la altura de eje H de una máquina horizontal en el mismo marco básico. Cuando el soporte es desconocido, la mitad del diámetro de la máquina puede ser utilizada.

Clasificación de acuerdo a la Flexibilidad del Sistema Soportante

Dos condiciones son usadas para clasificar la flexibilidad del soporte en las direcciones especificadas:

- Soporte rígido
- Soporte flexible

Si la primera frecuencia natural del sistema máquina/soporte en la dirección de la medición es mayor que su frecuencia principal de excitación (en la mayoría de los casos es la frecuencia de rotación) en al menos un 25%, entonces el sistema soporte puede ser considerado

rígido en esa dirección. Todos los otros sistemas soportes pueden ser considerados flexibles.

En algunos casos el sistema soporte- máquina puede ser considerado rígido en una dirección de medición y flexible en la otra dirección. Por ejemplo, la primera frecuencia natural en la dirección vertical puede estar sobre la frecuencia principal de excitación mientras que la frecuencia natural horizontal puede ser considerablemente menor. Tales sistemas serían rígidos en el plano vertical y flexible en el plano horizontal. En estos casos la vibración debe ser evaluada acorde con la clasificación del soporte que corresponda en la dirección de la medición. Si la clase del sistema máquina- soporte no puede ser determinada fácilmente de cálculos y gráficos, se puede determinar por pruebas experimentales.

EVALUACIÓN

La Norma ISO 10816 – 1 provee una descripción general de dos criterios usados para la evaluación de la severidad vibratoria en los distintos tipos de máquinas y en especial en las bombas. Un criterio considera la magnitud de la vibración global en un ancho de banda y el segundo criterio considera los cambios en la magnitud de vibración, independiente de si aumentan o decrecen.

CRITERIO I: Magnitud de la vibración

Este criterio define límites para la magnitud de vibración consistentes con aceptables cargas dinámicas en los apoyos y aceptables vibraciones transmitidas al ambiente a través de sus soportes. La máxima magnitud de la vibración medida en cada apoyo es usada para evaluar la severidad de la vibración de acuerdo al tipo de máquina y al tipo de soporte.

1.- Zonas de evaluación

Las siguientes zonas de evaluación son definidas para permitir una evaluación cualitativa de una máquina dada y proveer guías sobre posibles acciones a tomar.

Zona A: La vibración de máquinas nuevas o recientemente reacondicionadas puestas en servicio, normalmente debería estar en esta zona.

Zona B: Máquinas con vibración en esta zona son normalmente consideradas aceptables para operar sin restricción en un período largo de tiempo.

Zona C: Máquinas con vibración en esta zona son normalmente consideradas insatisfactorias para una operación continua para un tiempo prolongado.

Generalmente, estas máquinas pueden operar por un período limitado en esta condición hasta que se presente una oportunidad conveniente para reparar la máquina.

Zona D: Los valores de la vibración de esta zona son consideradas normalmente como suficientemente severos para causar daño a la máquina.

Mayores valores que los indicados en este estándar requieren que el fabricante de la máquina explique las razones de esto y en particular confirme que la máquina no sufrirá daño operando con valores vibratorios mayores.

Valores límites entre las zonas de evaluación

Los valores para los límites de las zonas se dan en las Tablas 12, 13,14 y 15. Al usar estas tablas se debe tomar el valor más alto de la vibración medido en las direcciones radiales de cualquier apoyo y la vibración axial en el apoyo de empuje. Se puede utilizar el valor del desplazamiento o de la velocidad de la vibración. Se utilizará el que sea más restrictivo según las tablas anteriormente mencionadas.

Vibración en Bombas

El criterio de evaluación de las Tablas 14 y 15 se aplica cuando se opera con el caudal nominal de la bomba. Cuando se opera en condiciones diferentes al nominal, aumentan las fuerzas hidráulicas y se

producen altas vibraciones. Estos valores pueden ser permisibles para cortos tiempos de operación, pero podrían causar daño o desgaste acelerado al término de largos períodos de operación.

Para la instalación de bombas, es importante tener un cuidado especial para evitar la resonancia en el sistema de tuberías y fundiciones conectadas a la bomba con los componentes de vibración a uno y dos veces la frecuencia de paso de los álabes, ya que puede causar una vibración excesiva.

CRITERIO II: Cambios en la magnitud de vibración

Este criterio evalúa los cambios de la magnitud de la vibración con relación a un valor de referencia establecido previamente. Si ocurre un cambio significativo en la magnitud de la vibración en un ancho de banda (10 Hz a 1000 Hz) puede necesitar una acción correctiva aunque no haya alcanzado la zona C del criterio 1. Estos cambios pueden ser instantáneos o progresivos con el tiempo y pueden indicar un daño incipiente o alguna otra irregularidad. El criterio 2 se aplica en base al cambio de la magnitud de la vibración que ocurre bajo la condición de funcionamiento en estado estacionario de la máquina.

Cuando el criterio 2 es aplicado, la medición de la vibración que se compara se debe tomar con el mismo sensor, en la posición y orientación anterior y bajo aproximadamente las mismas condiciones de

operación de la máquina. Cambios manifiestos en la magnitud de la vibración normal, sin importar su valor total, debe ser investigada para evitar una situación peligrosa. Cuando los cambios en la magnitud de la vibración exceden el 25% del valor superior de la zona B para las Tablas 13, 14, 15 y 16, ellos deben ser considerados significativos, particularmente si son repentinos. De ser así, se debe diagnosticar la razón de los cambios y determinar que acciones a tomar son adecuadas.

Estos valores se aplican al valor global RMS de la velocidad y desplazamiento vibratorio en el rango de frecuencias de 10 a 1000 Hz para máquinas con velocidad de rotación sobre 600 cpm, o en el rango de 2 a 1000Hz para máquinas con velocidad de rotación bajo 600 cpm. Si se espera que el espectro contenga componentes a baja frecuencia, la evaluación debería basarse tanto en la medición de la velocidad como del desplazamiento RMS, sino, como sucede en la mayoría de los casos es suficiente con medir únicamente la velocidad vibratoria.

TABLA 11

Clasificación de las zonas de severidad vibratoria para máquinas del grupo 1

<table>
<tr><th rowspan="2">Desplazamiento RMS ↘m</th><th rowspan="2">Velocidad RMS mm/s</th><th colspan="2">Tipo de soporte</th></tr>
<tr><th>Rígido</th><th>Flexible</th></tr>
<tr><td>bajo 29</td><td>bajo 2,3</td><td>A</td><td rowspan="2">A</td></tr>
<tr><td>29 - 45</td><td>2,3 - 3,5</td><td rowspan="2">B</td></tr>
<tr><td>45 - 57</td><td>3,5 - 4,5</td><td rowspan="2">B</td></tr>
<tr><td>57 - 90</td><td>4,5 - 7,5</td><td>C</td></tr>
<tr><td>90 - 140</td><td>7,5 - 11,0</td><td rowspan="2">D</td><td>C</td></tr>
<tr><td>sobre 140</td><td>sobre 11,0</td><td>D</td></tr>
</table>

TABLA 12

Clasificación de las zonas de severidad vibratoria para máquinas del grupo 2

<table>
<tr><th rowspan="2">Desplazamiento RMS
↘m</th><th rowspan="2">Velocidad RMS
mm/s</th><th colspan="2">Tipo de soporte</th></tr>
<tr><th>Rígido</th><th>Flexible</th></tr>
<tr><td>bajo 22</td><td>bajo 1,4</td><td>A</td><td rowspan="2">A</td></tr>
<tr><td>22 - 37</td><td>1,4 - 2,3</td><td rowspan="2">B</td></tr>
<tr><td>37 - 45</td><td>2,3 - 2,8</td><td rowspan="2">B</td></tr>
<tr><td>45 - 75</td><td>2,8 - 4,5</td><td>C</td></tr>
<tr><td>75 - 113</td><td>4,5 - 7,1</td><td rowspan="2">D</td><td>C</td></tr>
<tr><td>sobre 113</td><td>sobre 7,1</td><td>D</td></tr>
</table>

TABLA 13

Clasificación de las zonas de severidad vibratoria para máquinas del grupo 3

Desplazamiento RMS ↘m	Velocidad RMS mm/s	Tipo de soporte	
		Rígido	Flexible
bajo 18	bajo 2,3	A	A
18 - 28	2,3 - 3,5	B	
28 - 36	3,5 - 4,5		B
36 - 56	4,5 - 7,1	C	
56 - 90	7,1 - 11,0	D	C
sobre 90	sobre 11,0		D

TABLA 14

Clasificación de las zonas de severidad vibratoria para máquinas del grupo 4

<table>
<tr><th rowspan="2">Desplazamiento RMS
↘m</th><th rowspan="2">Velocidad RMS
mm/s</th><th colspan="2">Tipo de soporte</th></tr>
<tr><th>Rígido</th><th>Flexible</th></tr>
<tr><td>bajo 11</td><td>bajo 1,4</td><td>A</td><td rowspan="2">A</td></tr>
<tr><td>01-11-18</td><td>1,4 - 2,3</td><td rowspan="2">B</td></tr>
<tr><td>18 - 22</td><td>2,3 - 2,8</td><td rowspan="2">B</td></tr>
<tr><td>22 - 36</td><td>2,8 - 4,5</td><td>C</td></tr>
<tr><td>36 - 56</td><td>4,5 - 7,1</td><td rowspan="2">D</td><td>C</td></tr>
<tr><td>sobre 56</td><td>sobre 7,1</td><td>D</td></tr>
</table>

Configuración de valores de ALARMAS y PARADAS

Configuración de valores de alarmas

Los valores de ALARMA pueden variar considerablemente, hacia arriba o hacia abajo, para diferentes máquinas. Los valores elegidos son normalmente configurados relativos a un valor base (línea base) determinado por la experiencia para la posición o dirección de la medición para esa máquina en particular.

Se recomienda que el valor de ALARMA sea configurado sobre la línea base en una cantidad igual al 25% del límite superior para la zona B. si la línea base es baja, la ALARMA puede estar bajo la zona C.

Donde no esté establecida una línea base (por ejemplo con una máquina nueva) la configuración inicial del valor de ALARMA debería basarse sea en la experiencia con otras máquinas similares o en relación con valores de aceptación acordados. Después de un período de tiempo, se podrá establecer un valor para la línea base en estado estacionario y la configuración del valor ALARMA debería ajustarse en concordancia. Se recomienda que el valor de ALARMA normalmente no sobrepase 1,25 veces el límite superior de la zona B.

Si la línea base en el funcionamiento estacionario de la máquina cambia (por ejemplo, después que una máquina ha sido separada), la configuración del valor de ALARMA debería revisarse en concordancia.

Configuración de valores de PARADA

Los valores de parada generalmente se relacionan con la integridad mecánica de la máquina y es dependiente de sus características específicas de diseño, las cuales han sido introducidas para permitir que la máquina resista fuerzas dinámicas anormales. Los valores usados deberán, por consiguiente, generalmente ser los mismos para todas las máquinas de diseño similar y no debería normalmente estar relacionado con el valor de la línea base en el estado estacionario usado para la configuración de ALARMAS.

Aquí puede haber diferencias para las máquinas de diferente diseño y no es posible dar guías claras para valores absolutos de PARADAS. En general, el valor de PARADA estará dentro de la zona C o D, pero es recomendado que el valor de PARADA no debiera exceder 1,25 veces el límite superior de la zona C.

CAPÍTULO 5

5. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

5.1 Análisis de los tiempos improductivos por fallas imprevistas en el Sistema de Bombeo

Entre la información que se ingresa diariamente, se tiene un reporte denominado Tiempos Programados e Imprevistos, donde se registran tiempos de preparación de máquinas, corrida de producción, paros programados y NO programados; dentro de los cuales se detalla la causa del tiempo improductivo.

En el **Apéndice G** se detalla claramente los tiempos programados imprevistos que suceden a diario en la Planta y especialmente en el Sistema de Bombeo.

Este reporte sirve para determinar los tiempos de paradas para todas las máquinas que conforman el Molino 1 y Molino 2, pero para el estudio se considera los datos específicamente de las Bombas. Este informe es llenado por cada Jefe de Turno encargado de la Producción tanto para Molino 1 como para Molino 2, y revisado por el Superintendente de Producción.

En la figura 5.1 se observa que la tendencia de los tiempos perdidos en los Molinos 1 y 2, después de la implementación del Sistema de Mantenimiento Predictivo, ha ido disminuyendo, en comparación con lo que ocurría antes del año 2003.

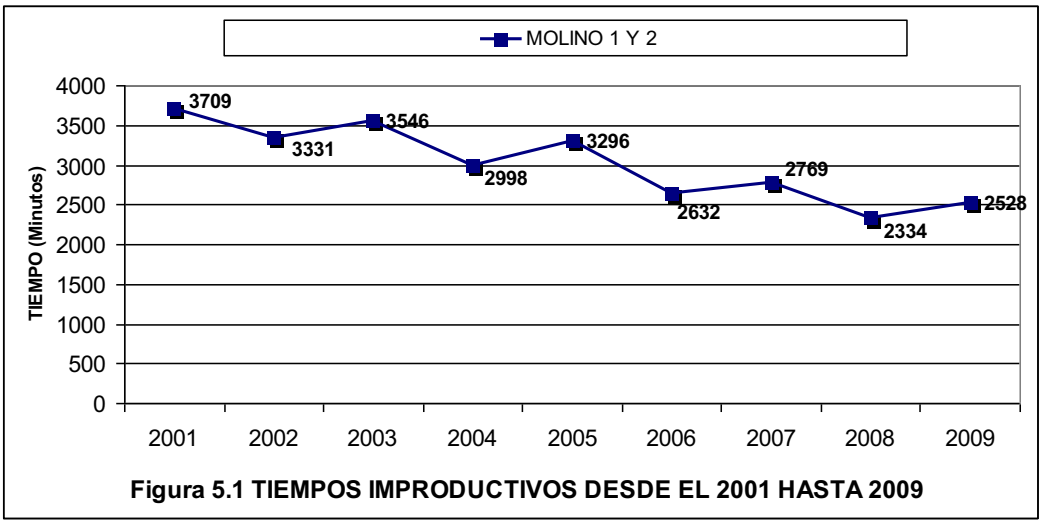


Figura 5.1 TIEMPOS IMPRODUCTIVOS DESDE EL 2001 HASTA 2009

Los datos que se ilustran en la figura 5.2, muestran las causas que más afectan al Sistema de Bombeo, que representan el 80 % de las paradas no planeadas. En este porcentaje están las causas siguientes:

- Armónicos eléctricos
- Daños en los rodamientos
- Desalineamiento
- Holgura mecánica
- Desbalanceo
- Armónicos de paso de alabes

El otro 20% lo componen causas tales como flexibilidad en base de motor, problemas con el impulsor, entre otros.

En el punto 4.4 se explica, con mayor detalle, esta mejora en los tiempos improductivos que hace que el Sistema se vuelva más eficiente.

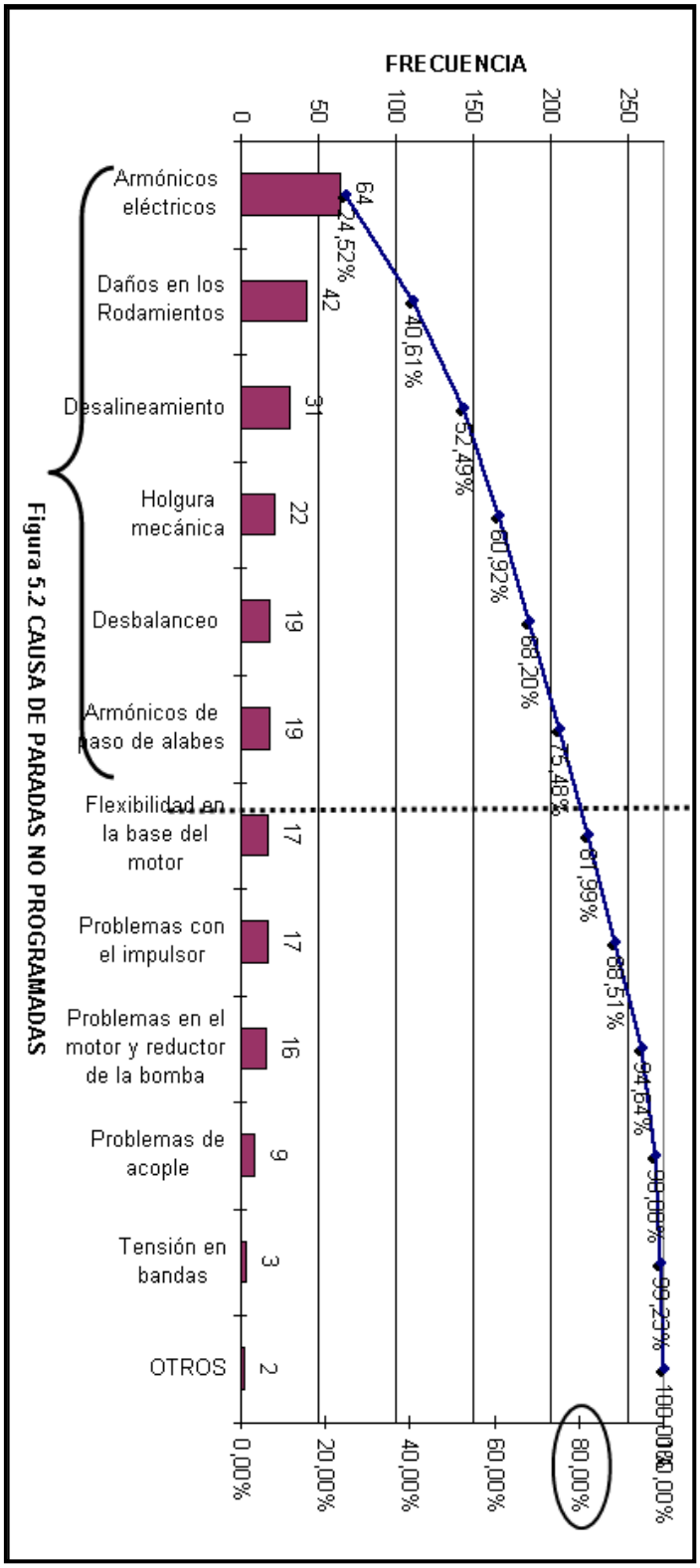


Figura 5.2 CAUSA DE PARADAS NO PROGRAMADAS

Cada uno de los modos de falla presentado en el diagrama de Pareto tiene su explicación mas clara en el punto 4.2 donde se escribe acerca de las fallas No programadas y la frecuencia de vibración que corresponde a cada uno de las causas de falla.

5.2 Análisis estadístico de las ocurrencias de los distintos problemas generados por la vibración en el Sistema de Bombeo

El análisis de vibraciones en el Sistema de Bombeo se basa en el hecho de que en muchos casos es posible relacionar las frecuencias de vibración con el problema específico con el que nos hemos encontrado, mientras que la amplitud de la misma da una indicación de la severidad del problema.

En la Tabla 15 se presenta un listado de las frecuencias comúnmente encontradas en espectros de vibración de los equipos, junto con las causas probables de los problemas asociados a las mismas.

TABLA 15

Frecuencia de Causas probables de Falla en el Sistema de Bombeo

FRECUENCIA	CAUSAS PROBABLES DE FALLA
1 X RPM	Desbalanceo, engranajes o poleas descentradas, desalineamiento o eje flexionado, resonancia, problemas eléctricos, fuerzas alternativas.
2 X RPM	Huelgos o juegos mecánicos, desalineamiento, fuerzas alternativas, resonancia.
3 X RPM	Desalineamiento, combinación de huelgos mecánicos axiales excesivos con desalineamiento
Menor a 1 X RPM	Remolino de aceite (oil whirl) en cojinetes o rotores
Frecuencia de Línea	Problemas eléctricos
Armónicos de RPM	Engranajes dañados, fuerzas aerodinámicas, fuerzas hidráulicas, huelgos o juegos mecánicos, fuerzas alternativas
Alta frecuencia (No armónicos)	Cojinetes antifricción en mal estado

Como puede apreciarse en esta tabla, existen numerosos problemas mecánicos y eléctricos que pueden originar espectros de frecuencia similares. En estos casos es necesario obtener información adicional, ya sea a través de la medición de las vibraciones en distintas direcciones, como así también analizando los espectros obtenidos en distintas condiciones de operación de la máquina o analizando transitorios como los de arranque y detención de la máquina o relaciones de fase entre puntos de medición. Por ejemplo dos causas muy comunes de fallas,

como son el desbalanceo y desalineamiento producen espectros con picos importantes en 1 x RPM, por lo que para reconocerlos se deben tener en cuenta otras características como las presentadas en la Tabla 16.

TABLA 16

Diferencia entre Desbalanceo y Desalineamiento

DESBALANCEO	DESALINEAMIENTO
Pico importante en 1xRPM	Importantes armónicas de 1 X RPM
Vibraciones axiales bajas	Altas vibraciones axiales
Mediciones en fase	Mediciones en contrafase
Independiente de la temperatura	Las vibraciones cambian con el aumento de temperatura
Depende de la velocidad debida a la fuerza centrífuga	Baja sensibilidad a los cambios de velocidad

Un análisis estadístico de las ocurrencias de los distintos problemas presentados en el Sistema de Bombeo indica que:

- Un 24,52 % de los problemas se debe a Armónicos Eléctricos
- 16,09% debido a daño en Rodamientos
- 11,88% debido a Rodamientos, etc

El análisis estadístico completo se muestra en la TABLA 17, donde se ilustra con detalle la frecuencia de las causas probables de falla en el Sistema de Bombeo

Por lo tanto, un análisis racional de vibraciones en maquinarias debería comenzar analizando los problemas de mayor ocurrencia estadística como se indica en la figura 5.3, y luego de descartarlos seguir con los menos probables.

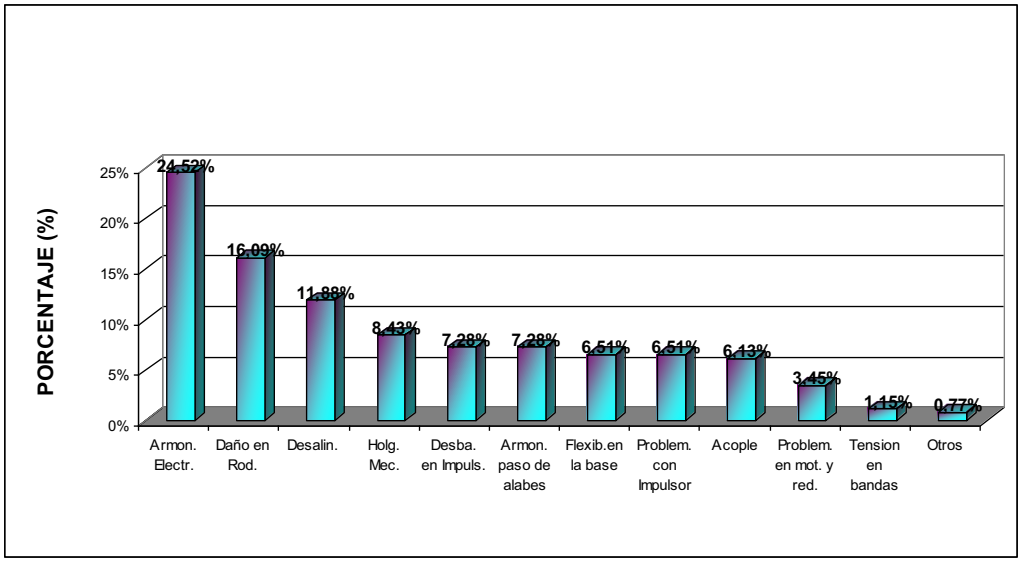


Figura 5.3 Análisis Estadístico de los problemas ocurridos en el Sistema de Bombeo

TABLA 17

Frecuencia de Causas probables de Falla en el Sistema de Bombeo

DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	FRECUENCIA	PORCENTAJE
Armónicos eléctricos	64	24,52%
Daños en los Rodamientos	42	16,09%
Desalineamiento	31	11,88%
Holgura mecánica	22	8,43%
Desbalanceo	19	7,28%
Armónicos de paso de alabes	19	7,28%
Flexibilidad en la base del motor	17	6,51%
Problemas con el impulsor	17	6,51%
Problemas en el motor y reductor de la bomba	16	6,13%
Problemas de acople	9	3,45%
Tensión en bandas	3	1,15%
Chumaceras, lubricación, eje del porta brazos, desgaste interno en bombas, aspas del rotor del ventilador, daño en los empaques y problemas por cavitación.	2	0,77%
TOTAL	261	100,00%

5.3 Ahorro económico por el sistema implementado

Es difícil evaluar el beneficio económico de la implementación del sistema de mantenimiento predictivo y plasmarlo con cifras concretas, ya que ello es motivo de un estudio exhaustivo por parte de la ingeniería de mantenimiento, que requiere un tiempo del que normalmente no se dispone. El indicador mas extendido el “retorno de inversión” ROI, que es una relación que implica el ingreso generado por un centro de inversión a los recursos (o base de activos) usados para generar dicho ingreso: ROI = Ingreso (ahorro) / Inversión.

En Papelera Nacional S.A. se suele valorar en 10,5 el ROI de la Implementación del sistema, aunque ya hemos comentado es difícilmente valorable los ahorros en mano de obra, en repuestos en incremento de seguridad, aumento de vida de las máquinas, etc.

Es evidente que el criterio “ahorro” fue el que movió y decidió a los ejecutivos de la Empresa a realizar la inversión que supone la implantación de este método de mantenimiento. Esto es; es necesario realizar una evaluación de la rentabilidad de esta inversión.

El problema que se enfrenta para realizar esta tarea, es que para evaluar la factibilidad del nuevo método de mantenimiento es imprescindible partir de su ejecución o implantación. Una vez efectuado el cómputo en términos de costos por paradas imprevistas y costos por averías (en el procedimiento convencional de mantenimiento), se procede a la implantación del mantenimiento predictivo. La suma de costos a futuro, correspondiente, será la mejor evaluación que se pueda realizar de la inversión. Por consiguiente, en una primera etapa es fundamental apelar a la credibilidad técnica por parte de los futuros usuarios y a la comparación o ilustración de experiencias acontecidas en otras empresas industriales del mismo país u otros países. En los países desarrollados el método de mantenimiento por vibraciones mecánicas constituye una técnica tan extendida en la industria, que actualmente no requiere de muy amplia fundamentación económica.

Los beneficios económicos que se han logrado por la implementación del Sistema de Mantenimiento Predictivo, aunque han sido de una forma u otra, mencionados anteriormente, serán expuestos de forma resumida a continuación:

1. Reducción de las máquinas de reserva;
2. Reducción notable del período de mantenimiento;
3. Reducción del personal de mantenimiento propio y el contratado;
4. Reducción de los gastos (capital inmovilizado) por equipos, máquinas menores, elementos de máquinas y piezas de repuesto en almacenes;
5. Eliminación de las averías por roturas inesperadas, esto es, fiabilidad y productividad superiores.
6. Eliminación de los daños en la producción final de alto costo debido a fallas de elementos de poco valor.
7. La implementación del Sistema de Mantenimiento Predictivo, representó para Papelera Nacional S.A. que la disponibilidad de los equipos críticos del Sistema de Bombeo se mantenga en un $99,8^{+}_{-}$ 0,1 %. Estos índices hacen que se traduzcan en beneficios financieros importantes para la empresa.

5.4 Evaluación del incremento en la disponibilidad en el Sistema de Bombeo

Para estimar la disponibilidad en el sistema de bombeo de la industria Papelera, se aplica a todos los procesos que esta conforma como son Preparación de Pasta y Máquina de Papel del Molino 1 y Preparación de Pasta y Máquina de Papel del Molino 2 como se muestra en el **Apéndice E**. Permite poner en evidencia que porcentaje del tiempo nominal de producción de cada proceso está afectado por paradas debidas a roturas, y/o reparaciones.

Vamos a analizar en que consiste la disponibilidad de los equipos, la forma en la que se hace el cálculo de estas disponibilidades y el formato que se usa para tal efecto.

Disponibilidad de Equipos

La Disponibilidad de un equipo es el principal indicador de su eficiencia y, en términos generales, indica el porcentaje de tiempo que el equipo estuvo realmente “disponible”, respecto al tiempo total que debería de haberlo estado. En otras palabras, si una línea de proceso o planta trabaja 16 horas diarias, se necesita que los equipos involucrados estén disponibles durante esas 16 horas del día, si por alguna razón no

externa, el equipo se detiene o falla, el tiempo en el que esté parado o averiado, afectará su nivel de disponibilidad. Si el paro del equipo se debe a razones externas (suspensión del servicio eléctrico, por ejemplo), el tiempo no afectará la disponibilidad del equipo. Existen ocasiones en las que un equipo de la línea de proceso detiene toda la línea, en este caso la disponibilidad afectada es la del equipo que se detiene o falla, no así las del resto de equipos de la línea; para estos equipos se trata de un paro externo.

Cálculo de la disponibilidad de los equipos

Para calcular la disponibilidad de los equipos que se analizan es adecuado desarrollar una hoja electrónica que, a través de las fórmulas adecuadas, nos permita fácilmente llevar el registro de lo que acontece. Algunos de los datos que se recaban en la hoja electrónica sirven para calcular varios indicadores. Para el cálculo de la disponibilidad la hoja electrónica debe contener los siguientes datos:

- **Tiempo total disponible del período (TTDP):** dependiendo del período analizado, será el tiempo diario, semanal o mensual en el que el equipo debe estar disponible para su utilización. Si se tratara del caso expuesto en el punto anterior y se estuviese

calculando para una semana laboral de seis días, el cálculo sería el siguiente: 16 hrs x 6 días = 96 hrs en la semana.

- **Tiempo de paros preventivos programados (TPPP):** Consiste en la suma de todos los tiempos de paro debido a mantenimiento preventivo que se realizan al equipo dentro del horario en el que tiene que estar disponible, en el caso ejemplo, dentro de las 16 hrs del día de semana laboral.
- **Tiempo de paros correctivos programados (TPCP):** Similar al punto anterior, sólo en lo referente a los mantenimientos correctivos programados.
- **Total de horas de paro por fallas (THPF):** suma de los tiempos de paro por fallas o averías emergentes de cualquier tipo.

Utilizando los datos descritos anteriormente, la disponibilidad de un equipo se calcula como sigue:

$$\% \text{ Disp} = [\text{ TTDP} - (\text{ TPPP} + \text{TPCP} + \text{THPF})] / \text{TTDP X } 100$$

En el **Apéndice F** se presenta el formato utilizado para el cálculo automático de la disponibilidad de los equipos críticos del Sistema de Bombeo de la Industria Papelera y en el capítulo 4.3 lo explica.

Pasos necesarios para el incremento de la disponibilidad en el Sistema de Bombeo

A continuación se describen las actividades necesarias para mejorar la disponibilidad de los equipos críticos del Sistema de Bombeo. Es importante tomar en cuenta la secuencia de los pasos para asegurar una implementación más eficaz:

En términos de la gestión de los equipos

1. Desarrollo del listado completo de equipos del Sistema de Bombeo tanto en el Molino 1 y 2. El listado debe contener todos los equipos y subequipos sujetos a mantenimiento.
2. Definición de la criticidad de los equipos de Bombeo enlistados, para determinar cuáles son críticos A, B y C. Esta investigación se ocupará únicamente de los equipos clasificados como críticos. Esto se muestra con mayor detalle en el Capítulo 5.5.
3. Desarrollo de los listados de repuestos críticos de los equipos críticos de bombeo. Los listados de repuestos son importantes al momento de definir los planes de mantenimiento. El carecer de un repuesto importante al momento de un mantenimiento planificado, afecta directamente la efectividad del mantenimiento específico.

4. Seguimiento al sistema de Solicitud de Mantenimiento/Reporte de Fallas y Órdenes de Trabajo de los equipos críticos del sistema de bombeo. Esto es necesario para asignar los trabajos de mantenimiento al personal, contabilizar los tiempos de paro de los equipos debido a actividades de mantenimiento y como registro de las actividades desarrolladas en un equipo específico (historial del equipo).

En términos de la gestión del mantenimiento

1. Desarrollo del formato para cálculo de disponibilidades en equipos críticos de planta. La importancia de este formato quedó clara al inicio del capítulo.

2. Desarrollo e implementación del formato de Control de Tiempos de Operación / Tiempos de Parada de los equipos. En este formato el personal de Producción y de Mantenimiento reportan los tiempos de paro de los equipos dentro del horario diario de trabajo e identifican la posible causa del paro o falla, tal como se muestra en el **Apéndice G**. Estos datos son necesarios para el cálculo de la disponibilidad.

3. Análisis de Pareto mensual por área para determinar los equipos críticos del Sistema de Bombeo que presentan mayor cantidad de problemas y las fallas que más se repiten. Los equipos con mayor

número de fallas y las fallas recurrentes se convierten en las prioridades del sistema de gestión de mantenimiento.

4. Revisión de las rutinas de mantenimiento preventivo nocturnas y diurnas de los equipos críticos de Bombeo (limpieza, etc.), su actualización y ajuste a los requerimientos de cada equipo.

5. Creación e implementación de rutinas preventivas de monitoreo de condición (análisis de aceite, termografía, monitoreo de vibraciones, ultrasonido, etc.), para los equipos críticos del Sistema de Bombeo que lo requieran.

6. Desarrollo de un estudio de lubricación para los equipos críticos de Bombeo y determinación de las rutinas preventivas relacionadas. Esto incluye nivelación de aceites, lubricaciones y engrases.

7. Creación de Planes Preventivos de Mantenimiento generales en base a rutinas diurnas, nocturnas, monitoreos de condición, lubricación y análisis FMEA (Análisis de Modos y Efectos de Falla).

Antes de la Implementación del Sistema de Análisis de Vibración; es decir antes del año 2003, la disponibilidad calculada de los equipos críticos del Sistema de Bombeo en la industria Papelera era del 99,75%. Tras implementar en el año 2003 el Sistema de Análisis de Vibraciones

como Técnica Predictiva, la disponibilidad de estos equipos se encuentra en promedio arriba del 99,90% como se muestra en la figura 5.4.

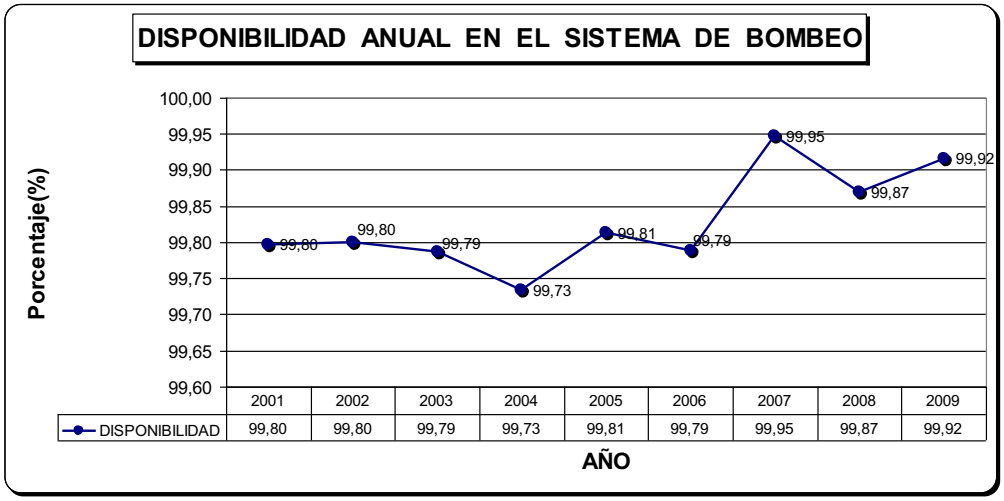


Figura 5.4 Disponibilidad anual en el Sistema de Bombeo

Estos resultados nos dan una idea como la Disponibilidad del Sistema de Bombeo se ha mantenido en un $99{,}80^{+}_{-}0{,}1\%$ en los últimos años haciendo que los equipos sean más confiables y eficientes.

5.5 Análisis cuantitativo para la evaluación de criticidad en el Sistema de Bombeo

El análisis de la criticidad en el Sistema de Bombeo de la industria Papelera nos sirve para poder jerarquizar, por importancia, los elementos (sistemas) sobre los cuales vale la pena dirigir recursos

(humanos, económicos y tecnológicos). Además ayuda a identificar eventos potenciales indeseados, en el contexto de la confiabilidad operacional.

CRITERIOS PARA DETERMINAR LA CRITICIDAD DE EQUIPOS

Los criterios que van a ser expuestos a continuación están sujetos a dos factores muy importantes, la frecuencia de la falla y la consecuencia de su aparición. Cabe señalar que estos factores a considerar para la selección y determinación de equipos críticos están mencionados en el Formato de Criticidad del **Apéndice C** que se utilizó en el análisis, los cuales resumen los siguientes aspectos:

- **Seguridad:** Efecto del fallo sobre personas y entorno.
- **Calidad:** Efecto del fallo sobre la calidad del producto.
- **Operaciones:** Efecto del fallo sobre la producción.
- **Mantenimiento:** Tiempo y costo de reparación.

Estos criterios y su cuantificación están sujetos a ser ajustados para diferentes empresas, pero de manera general se los determinó de la siguiente manera:

TABLA 18

CRITERIOS DE CRITICIDAD Y SU CUANTIFICACIÓN

CRITERIOS PARA DETERMINAR CRITICIDAD	CUANTF.
Frecuencia de fallas:	
Pobre mayor a 4 fallos/año	4
Promedio 2-4 fallas/año	3
Buena 1 - 2 fallas/año	2
Excelente menos de 1 fallas/año	1
Impacto Operacional:	
Pérdida de todo el despacho	10
Parada del sistema o subsistema	7
Impacta en niveles de inventario o calidad	4
No genera ningún efecto significativo	1
Flexibilidad Operacional:	
No existe opción de producción y no hay función de repuesto	4
Hay opción de repuesto compartido	2
Función de repuesto disponible	1
Costo de Mtto.	
Mayor o igual a $ 20000	2
Inferior a $ 20000	1
Impacto en Seguridad Ambiente Higiene (SAH)	
Afecta la seguridad humano tanto externa como interna	8
Afecta el ambiente	7
Afecta las instalaciones causando daños severos	5
Provoca daños menores	3
No provoca ningún tipo de daños	1

Para realizar el análisis de criticidad se utilizará los siguientes criterios, los cuales nos van a servir para poder evaluar la siguiente fórmula:

CRITICIDAD TOTAL = FRECUENCIA X CONSECUENCIA

Primero se define la frecuencia de falla de los procesos a analizar, cuantificando las frecuencias de falla con un valor, para así de esta manera poder determinar cuales serán los equipos críticos. A continuación un ejemplo de aplicación.

TABLA 19

EJEMPLO DE FRECUENCIA DE FALLAS EN BOMBAS

PROCESO	FRECUENCIA	CUANTIFICACIÓN
PREPARACIÓN DE PASTA MOLINO 1	2 - 4 Fallas / Año	3
MÁQUINA DE PAPEL MOLINO 1	2 - 4 Fallas / Año	3
PREPARACIÓN DE PASTA MOLINO 2	1 - 2 Fallas / Año	2
MÁQUINA DE PAPEL MOLINO 2	1 - 2 Fallas / Año	2

Los valores de la cuantificación se asignan de forma lógica con relación a las frecuencias de falla, lo que quiere decir que fácilmente se pudieron haber asignado valores distintos, siempre y cuando sean lógicos con las frecuencias de falla.

Ahora se analizará las consecuencias de las fallas para así poder determinar el segundo factor de la fórmula anterior, el cual se calcula con la siguiente fórmula:

Consecuencia=(Impacto_Operacional*Flexibilidad)+Costo_Mtto.+Impacto_SAH

Impacto Operacional

El impacto operacional es aquel que determina el comportamiento de la producción en presencia de una eminente falla. A continuación un ejemplo de aplicación.

TABLA 20

EJEMPLO DE IMPACTO OPERACIONAL EN BOMBAS

PROCESO	IMPACTO OPERACIONAL	CUANTIFICACIÓN
PREPARACIÓN DE PASTA MOLINO 1	Parada del Sistema o Subsistema	7
MÁQUINA DE PAPEL MOLINO 1	Parada del Sistema o Subsistema	7
PREPARACIÓN DE PASTA MOLINO 2	Pérdida de todo el despacho	10
MÁQUINA DE PAPEL MOLINO 2	Pérdida de todo el despacho	10

Flexibilidad Operacional

La flexibilidad operacional se refiere a las posibilidades de poder recuperar la pérdida con componentes en stand-by.

TABLA 21

EJEMPLO DE FLEXIBILIDAD OPERACIONAL EN BOMBAS

PROCESO	FLEXIBILIDAD OPERACIONAL	CUANTIFICACIÓN
PREPARACIÓN DE PASTA MOLINO 1	Función de repuesto disponible	1
MÁQUINA DE PAPEL MOLINO 1	No existe opción de producción y no hay función de repuesto	4
PREPARACIÓN DE PASTA MOLINO 2	Función de repuesto disponible	1
MÁQUINA DE PAPEL MOLINO 2	No existe opción de producción y no hay función de repuesto	4

Costos de Mantenimiento

Los costos de mantenimiento se refieren a los costos que genera reparar esa determinada falla, en este punto el equipo natural de trabajo deberá tener en cuenta el personal y los repuestos requeridos.

TABLA 22

EJEMPLO DE COSTOS DE MANTENIMIENTO EN BOMBAS

PROCESO	COSTOS DE REPARACIÓN	CUANTIFICACIÓN
PREPARACIÓN DE PASTA MOLINO 1	Menor a $ 10.000	1
MÁQUINA DE PAPEL MOLINO 1	Mayor a $ 10.000	2
PREPARACIÓN DE PASTA MOLINO 2	Menor a $ 10.000	1
MÁQUINA DE PAPEL MOLINO 2	Mayor a $ 10.000	2

Impacto en la Seguridad Ambiental y Humana

La seguridad ambiental y humana se refiere a si esa determinada falla causa inseguridad tanto en el medio ambiente como en los operarios. Ej: Un derrame de crudo, fugas con goteo de lubricantes de los equipos en el proceso productivo, escapes de gases contaminantes, etc.

TABLA 23

EJEMPLO DE IMPACTO S.A.H. EN BOMBAS

PROCESO	IMPACTO S.A.H.	CUANTIFICACIÓN
PREPARACIÓN DE PASTA MOLINO 1	Provoca daños menores	3
MÁQUINA DE PAPEL MOLINO 1	Afecta las instalaciones causando daños severos	5
PREPARACIÓN DE PASTA MOLINO 2	Provoca daños menores	3
MÁQUINA DE PAPEL MOLINO 2	No provoca ningún tipo de daños	1

Definición de matriz de Criticidad de Equipos. Variables que intervienen

La Matriz de Criticidad o de Riesgo es una herramienta que permite establecer niveles jerárquicos de criticidad en sistemas, equipos y componentes en función del impacto global que generan, con el objetivo de facilitar la toma de decisiones y priorización de los mantenimientos programados, sean preventivos o predictivos.

Los pasos para elaborar la matriz de criticidad son los siguientes:

- Describir el proceso productivo pero indicando en cada parte del proceso, el tipo de operación que realizan, es decir, si son de operación manual (sólo personas), semi-automático (personas y equipos) o sólo automáticos (máquinas especializadas).

- Identificar los sub-sistemas que involucren operación semi-automático u automático.

- Efectuar el cálculo de frecuencias y consecuencias de fallas en los equipos principales para cada parte del proceso.

- Determinar la matriz de criticidad con cada uno los procesos sujetos al análisis previo.

Frecuencia							
	4	SC	C	C	C	C	**Leyenda:**
	3	SC	SC	C	C	C	**C:** Crítico
	2	NC	NC	SC	C	C	**SC**: Semi Crítico
	1	NC	NC	SC	SC	C	**NC:** No Crítico
		10	20	30	40	50	
		CONSECUENCIAS					

Figura 5.5 Modelo de Matriz de Riesgo

Continuando con el ejemplo de aplicación del punto anterior se tiene que, una vez determinada y cuantificada las Consecuencias de las fallas y sus frecuencias, se procederá a realizar la matriz de criticidad sobre la base de la siguiente ecuación:

$$\textit{Criticidad Total=Frecuencia*Consecuencia}$$

$$\textit{Consecuencia=(Impacto_Operacional*Flexibilidad)+Costo_Mtto.+Impacto_SAH}$$

TABLA 24

EJEMPLO DE CÁLCULO DE CRITICIDAD EN BOMBAS

PROCESO	CONSECUENCIAS	FRECUENCIA
PREPARACIÓN DE PASTA MOLINO 1	12	3
MÁQUINA DE PAPEL MOLINO 1	18	3
PREPARACIÓN DE PASTA MOLINO 2	15	2
MÁQUINA DE PAPEL MOLINO 2	17	2

Los resultados obtenidos en esta matriz son el resultado de las opiniones y análisis de los datos históricos de las fallas por parte del equipo natural de trabajo, es por ello que es muy importante si no se tiene datos históricos de las fallas de las máquinas, que el equipo sea conformado con personal de las diferentes áreas y de todos los niveles esto con el fin de no dejar escapar equipos o componentes críticos.

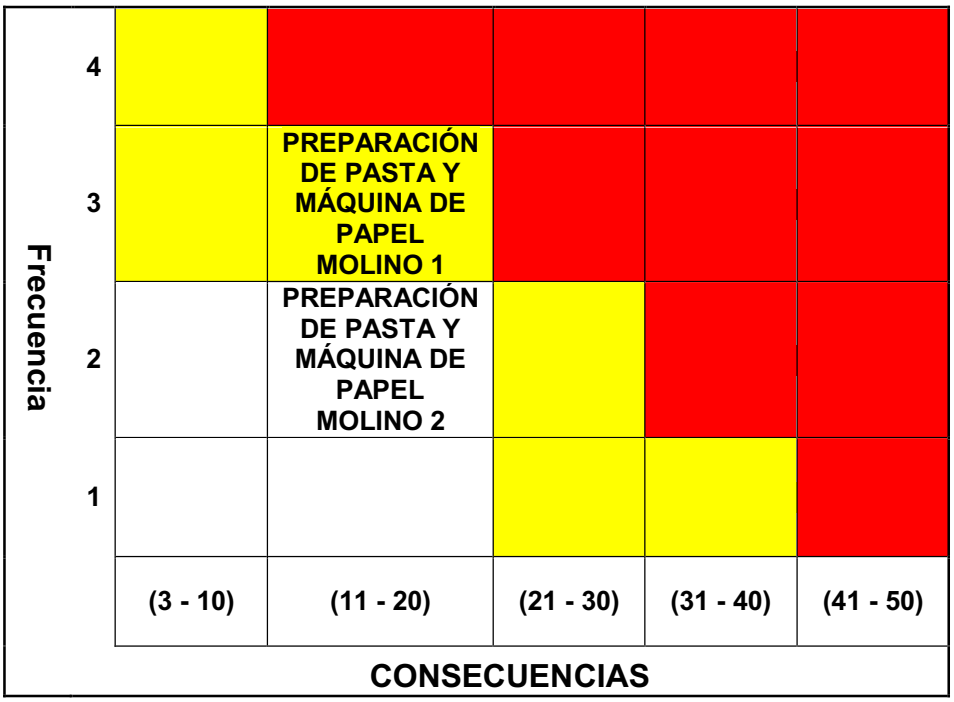


Figura 5.6 EJEMPLO DE MATRIZ DE RIESGO

TABLA 25

EJEMPLO DE CÁLCULO DE CRITICIDAD TOTAL EN BOMBAS

PROCESO	CRITICIDAD
PREPARACIÓN DE PASTA MOLINO 1	SEMI - CRÍTICO
MÁQUINA DE PAPEL MOLINO 1	SEMI - CRÍTICO
PREPARACIÓN DE PASTA MOLINO 2	NO CRÍTICO
MÁQUINA DE PAPEL MOLINO 2	NO CRÍTICO

Dentro de este ejemplo de aplicación, el proceso de mayor criticidad resultó ser las de Preparación de Pasta y Máquina de Papel del Molino 1 como se muestra en el Documento del **Apéndice D**.

CAPÍTULO 6

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Conclusiones

1. Como resultado de la implementación de este proyecto se han determinado nuevos indicadores para ir tomando en cuenta a futuro como es la disponibilidad, la criticidad, severidad vibratoria, FMCA (Análisis de Modo de falla, efecto y criticidad), etc. Llevando un control de estos indicadores disminuirá los tiempos improductivos y mejorará la productividad.

2. Fue necesario establecer que la etapa crítica del proceso productivo fue la de Preparación de Pasta y Máquina de Papel del Molino 1, para así saber a cuáles equipos se debió orientar este estudio y de esta manera precautelar la entrega a tiempo de las órdenes de producción, con una excelente calidad y controlando el buen funcionamiento de los mismos.

3. La implementación del Sistema de Mantenimiento Predictivo, representó para Papelera Nacional S.A. que la disponibilidad de los equipos críticos del Sistema de Bombeo se mantenga en un 99,8$^{+}_{-}$ 0,1 %. Estos índices hacen que se traduzcan en beneficios financieros importantes para la empresa.

4. A través del estudio de los tiempos improductivos por fallas imprevistas se determino que el 80% pertenecen a fallas eléctricas (Armónicos Eléctricos) y fallas en los rodamientos por problemas de desbalanceo y desalineamiento.

5. Es necesario mantener registros confiables de los diversos mantenimientos que se ejecutan a los equipos, ya que de esta manera se puede mejorar los resultados de los mantenimientos predictivos con el Sistema de Vibración.

Recomendaciones

1. Establecer políticas de Mantenimiento aprobadas por los directivos de la empresa, las mismas que deberán ser difundidas y compartidas por todos los trabajadores de la empresa.

2. Establecer un programa de capacitación administrativa y técnica para todo el personal del Departamento de Mantenimiento Predictivo, que incluya las iniciativas más importantes de la Gestión de Mantenimiento de Clase Mundial y las herramientas específicas del Mantenimiento Predictivo, para que los conceptos queden totalmente claros y se consolide la cultura predictiva en la empresa.

3. Incentivar a todos los técnicos del Departamento de Mantenimiento Predictivo al manejo del Software de Vibración para que las rutas de tomas de vibraciones no solo la haga una persona sino, que sea un trabajo en conjunto donde todos los integrantes del departamento sean los que trabajen en

lograr los objetivos que es disminuir los tiempos improductivos.

4. Realizar más pruebas de vibración para que las tendencias que se encontraron en el análisis preliminar de los espectros obtenidos de vibración, puedan tener un respaldo estadístico.

5. Colocar en una superficie plana el acelerómetro para tomar los datos de vibración, ya que al estar moviéndose la lectura no es cien por ciento confiable.

6. Cuidar de que el cable coaxial de conexión entre el acelerómetro y el analizador repose sobre una superficie, aunque esta vibre, ya que al dejarlo colgando puede afectar las mediciones. Otras recomendaciones sobre el uso y el manejo del Instrumento se encuentra en el catálogo Técnico.

BIBLIOGRAFÍA

1. OMAR AGUILAR MARTÍNEZ, Manual de "Mantenimiento Predictivo"- Análisis de Vibración,

2. J.P. DEN HARTOG "Mecánica de las Vibraciones"

3. GLENN D. WHITE "Introducción a VIBRACIÓN DE MÁQUINAS". Part Number 8569, versión 1.75 / 1995 DLI Engineering Corp.

4. A-MAQ S.A. ANÁLISIS DE VIBRACIONES "Tutorial de Vibraciones para mantenimiento mecánico", 2005

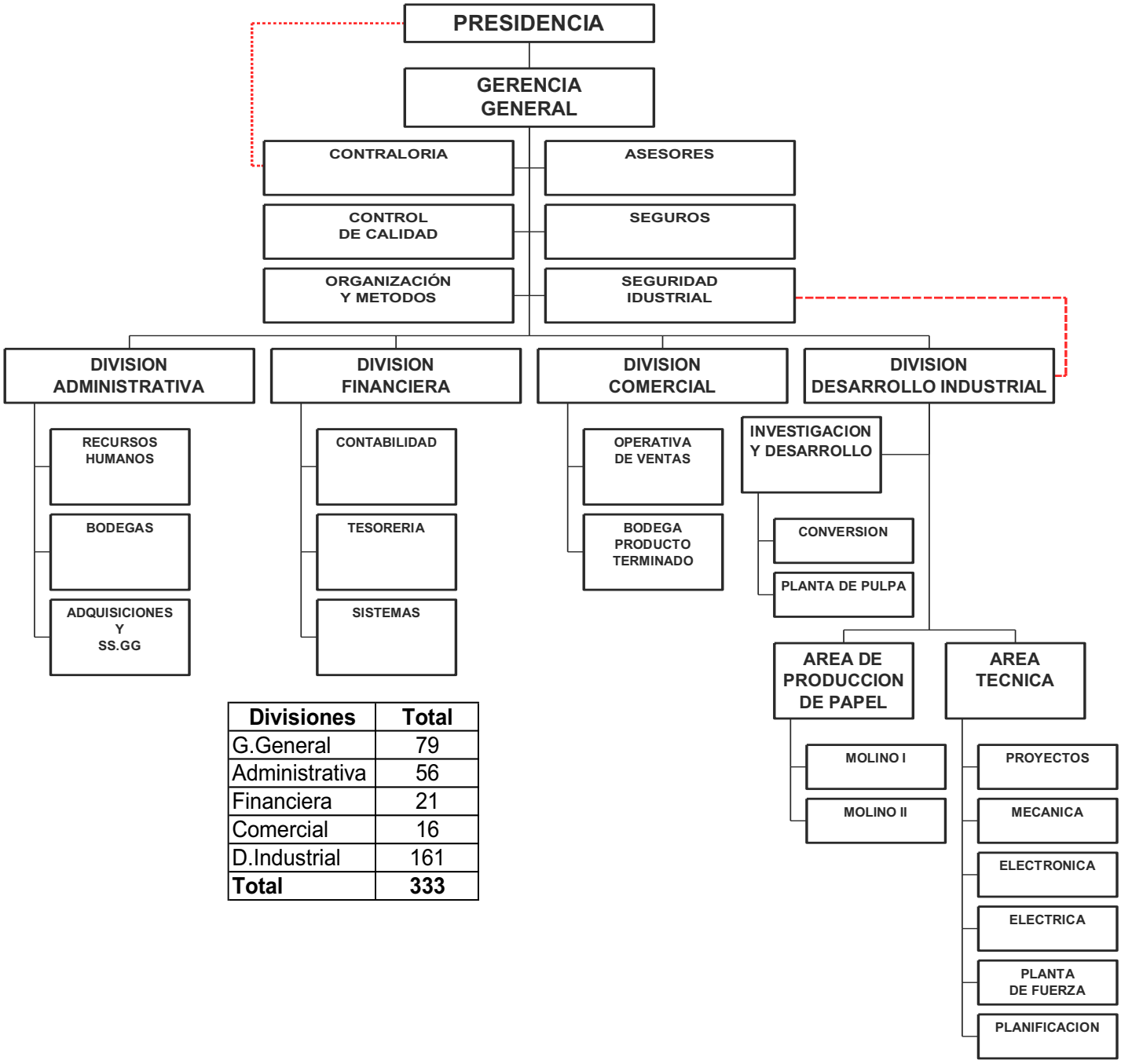
5. ALVARO PESANTEZ HUERTA "Elaboración de un plan de mantenimiento Predictivo y Preventivo en función de la criticidad de los equipos del Proceso productivo de una empresa empacadora de Camarón" (Tesis, Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción, Escuela Superior Politécnica, 2007)

6. SKF CONDITION MONITORING, “Material proporcionado por PAPELERA NACIONAL S.A. sobre Mantenimiento Predictivo, Guayaquil 2003.

7. SANTIAGO GARCÍA GARRIDO, “ Organización y gestión integral de Mantenimiento “ 28027 Madrid / Ediciones Díaz de Santos S.A. 2003

APÉNDICE A

ORGANIGRAMA DE LA EMPRESA



Divisiones	Total
G.General	79
Administrativa	56
Financiera	21
Comercial	16
D.Industrial	161
Total	**333**

APÉNDICE B

Presupuesto de la creación del Departamento de Mantenimiento Predictivo incluido el Software de Vibración

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	COSTO	TOTAL
SOFTWARE			
Colector Portátil DCA 50 con Software expertAlert	1	$ 29.137	$ 29.137
Pinza Amperimétrica	1	$ 535	$ 535
TOTAL			**$ 29.672**
EQUIPOS			
Computador Lap top PC	2	$ 1.500	$ 3.000
Computador HP escritorio	1	$ 950	$ 950
Monitor de Aceite	1	$ 780	$ 780
Probador digital 15 kv, marca Baker , aislamiento motores	1	$ 36.000	$ 36.000
LuxometroKyoritsu	1	$ 750	$ 750
TOTAL			**$ 41.480**
RECURSOS HUMANOS			
Hora de Trabajo - Hombre			
Ingeniero (JEFE)	1	$ 18.000	$ 18.000
Técnicos	3	$ 6.000	$ 18.000
TOTAL			**$ 36.000**
PRESUPUESTO TOTAL			$ 107.152

APÉNDICE C

FORMATO ANÁLISIS CUANTITATIVO DE CRITICIDAD

PAPELERA NACIONAL S.A.

SISTEMA MCC

ANÁLISIS DE CRITICIDAD

Criticidad Total = Frecuencia x Consecuencia Factor Frecuencia x Factor de Consecuencia

Frecuencia = Número de fallas por año

Consecuencia = (Impacto Operacional + Flexibilidad + Costo Mtto. + Impacto SAH)

Sistemas	Subsistemas	Descripción	**FRECUENCIA**	**CONSECUENCIAS DE FALLAS**				NIVEL DE CRITICIDAD	MATRIZ RIESGO
				IMPACTO OPERACIONAL	FLEXIBILIDAD	COSTOS DE MMTTO.	IMPACTO SAH		
Máquina de papel 2									
	Vacío en Máquina de Papel								
	Bomba de vacío		3	10	5	5	5	180	C
	Prensa		2	10	1	5	5	40	SC
	Extractor de aires		1	5	5	1	5	31	SC
	Bomba de Lodos		4	1	1	1	3	20	NC
	Refinadores		1	7	1	4	1	12	NC

FUENTE: PAPELERA NACIONAL S.A.

APÉNDICE D

EQUIPOS DEL SISTEMA DE BOMBEO DE MOLINO 1 Y 2

PROCESOS	*EQUIPOS*	*CÓDIGO DE EQUIPO*	*TIPO DE BOMBA*
PREPARACIÓN DE PASTA 1			
	BOMBA DEL DUMP CHEST	23B111-1	ALLIS CLAMERS PWO
	BOMBA TANQUE DE BROCKE	23B241	ALLIS CLAMERS PWO
	BOMBA AGUA BLANCA NORTE	23B321-1	GOULDS 3196 3X4-10
	BOMBA AGUA BLANCA SUR	23B322-1	GOULDS 3196 6X8-15
	BOMBA REGULACIÓN DE CONSISTENCIA	23B33	GOULDS 3175 4X6-12
	BOMBA TANQUE DE MÁQUINA	24B31	GOULDS 3175 4X6-12
	BOMBA DE QUÍMICO Nº1	22B121	ALLIS CHALMERS CSO
	BOMBA DE QUÍMICO Nº2	22B122	ALLIS CHALMERS CSO
	BOMBA DE QUÍMICO Nº3	22B221	JAECO
	BOMBA DE QUÍMICO Nº4	22B222	JAECO
	BOMBA DE QUÍMICO Nº5	22B521	ALLIS CHALMERS CSO
	BOMBA DE QUÍMICO Nº6	22B522	ALLIS CHALMERS CSO
	BOMBA DEL HIDROPULPER Nº 1	21B13-1	GOULDS 3175 6X8-12
	BOMBA DEL HIDROPULPER Nº 2	21B17	WARREN 3202
	BOMBA TANQUE KRAFT ALMACENAMIENTO	24B34	GOULDS 3175 3X6-12
	BOMBA DEL SEPART PLAST	231B122-1	
	BOMBA AGUA AL ESPESADOR CELLECO	23B61	GOULDS 3196 MTX 1,5X3-10

	BOMBA PRINCIPAL DE DESPERDICIO	24B111	WARREN 4-PH-12
	BOMBA AUXILIAR DE DESPERDICIO	24B112	WARREN 4-PH-12
	BOMBA KRAFT REFINACIÓN Nº 1	24B211	WARREN 4-PH-12
	BOMBA KRAFT REFINACIÓN Nº 2	24B212	WARREN 4-PH-12
	BOMBA AL SELECTIFIER	23B41	
	BOMBA PRIMARIA UNIFLOW	23B42	
	BOMBA SECUNDARIA UNIFLOW	23B45	GOULDS 3196 MTX 2X3-13
	BOMBA PRIMARIA POSIFLOW	23B43	GOULDS 3175M 8x 10-18
	BOMBA SECUNDARIA POSIFLOW	23B47	GOULDS 3196 MTX 2X3-13
MÁQUINA DE PAPEL 1			
	BOMBA Nº1 DEL REDUCTOR DEL AEG	481B111	
	BOMBA Nº2 DEL REDUCTOR DEL AEG	481B112	
	BOMBA DE VACÍO NASH Nº1	483B101	NASH 4001
	BOMBA DE VACÍO NASH Nº2	483B102	NASH 4002
	BOMBA DE VACÍO NASH Nº3	483B103	NASH 4001
	BOMBA BOOSTER	422B20	ALLIS CHALMERS SK
	BOMBA TANQUE DE PULPA DE MÁQUINA	41B111-1	GOULDS 3175 6X8-14
	BOMBA PRIMARIA DE MÁQUINA	41B21	GOULDS 3175 6X8-14
	BOMBA SECUNDARIA DE MÁQUINA	41B21-1	GOULDS 3175 6X8-14
	BOMBA FAN	41B30	WARREN 14-DLB-16-E

	BOMBA SUMP	483B20	Allis Chalmers 8x6
	BOMBA AGUA ALTA PRESIÓN	422B211-1	GOULDS 3355 1,5 x 2,5 x 7A
	BOMBA Nº 1 DEL TANQUE COUCH	423B31-1	Allis Chalmers PWO
	BOMBA Nº 2 DEL TANQUE COUCH	423B32	Warren 4-PH-12
	BOMBA PRINCIPAL SEPARADOR 1	484B361-1	GOULDS 3196 STX 1X1,5-6
	BOMBA AUXILIAR SEPARADOR 1	484B362	SIHI
	BOMBA Nº 1 SEPARADOR 4	484B331	SIHI
	BOMBA Nº 2 SEPARADOR 4	484B332-1	GOULDS 3196 STX 1X1,5-6
	BOMBA NASH Nº 4	483B104	NASH 1002/4
	BOMBA AGUA AL SILO	422B60	**(No hay datos técnicos)**
	BOMBA DE VACÍO CONDENSADOR	484B34	SIHI
PREPARACIÓN DE PASTA 2			
	BOMBA P14 A	84B171	GOULDS 3175 4X6-14
	BOMBA PRIMARIA UNIFLOW P05	83B60	GOULDS 3175 10X12-22
	BOMBA PRIMARIA POSIFLOW P15	83B62	GOULDS 3175 14X14-22
	BOMBA HIDROPULPER P02	81B13	GOULDS 3175S 4x 6-14
	BOMBA DEL DUMP CHEST P03	83B41-1	GOULDS 3175S 4x 6-14
	BOMBA CRIBA SECUNDARIA P04	83B54	GOULDS 3175S 3x 6-14
	BOMBA TANQUE BROCKE P22	83B72	GOULDS 3175S 3x 6-14
	BOMBA REFINADOR OCC P09	84B11	GOULDS 3175S 4x 6-14
	BOMBA SECUNDARIA UNIFLOW P06	83B61	GOULDS 3196 MTX 3X4-13

	BOMBA SECUNDARIA POSIFLOW P16	83B64	GOULDS 3175S 6x8-12
	BOMBA P08	83B70	GOULDS 3196 XLT 6X8-15
	BOMBA P29	83B68	GOULDS 3196 3X4-13
	BOMBA P07	83B66	GOULDS 3196 4X6-17
	BOMBA P23	83B67	GOULDS 3196MTX 4X6-13
	BOMBA DEL BELT PURGE	83B11	GOULDS 3175 3 x6-12
	BOMBA DUCHA DEL TROMMEL	831B16	GOULDS 3196 1,5 x 3-8
	BOMBA PRENSA DE LODOS Nº1	831B131	_
	BOMBA PRENSA DE LODOS Nº2	831B132	_
	BOMBA LIMPIADORES TERCIARIOS (P13)	832B80	GOULDS 3175 3 x6-12
	BOMBA AGUA AL SEPART PLAST	831B21	GOULDS 3196 1,5 x 3-8
	BOMBA ELUTRACIÓN	83B31	GOULDS 3656
	BOMBA HIDRAULICA DEL CORTADOR RAGGER	81B23	(FUERA DE SERVICIO)
MÁQUINA DE PAPEL 2			
	BOMBA P14	91B11	GOULDS 3175 4X6-14
	BOMBA Nº1 AGUA FRESCA RECUPERADA	922B40	GOULDS 3196 1,5X3-8
	BOMBA FAN P17	91B13	GOULDS 3475
	BOMBA SUMP P33	973B70	VOITH
	BOMBA DE VACÍO 7K1	973B10	VOITH
	BOMBA DE VACÍO 7K2	973B20	VOITH

	BOMBA DE VACÍO 10E	973B60	VOITH
	BOMBA DE VACÍO 10K	973B50	VOITH
	BOMBA DE VACÍO 8K1	973B30	VOITH
	BOMBA DE VACÍO 8K2	973B40	VOITH
	BOMBA DE VACÍO IBS	973B80	
	BOMBA P25	922B21	GOULDS 3355
	BOMBA Nº 2 AGUA P28A	922B41	GOULDS 3333
	BOMBA P19	922B311	GOULDS 3175 8x8-12
	BOMBA P19A	922B312	GOULDS 3175 8x8-12
	BOMBA P45	922B32	VOITH serie 2090
	BOMBA COUCH P20	923B31	GOULDS 3175S 4x 6-12
	BOMBA COUCH P21	923B32	GOULDS 3175S 4x 6-14
	BOMBA P30	921B14	GOULDS 3196 2x 3-8
	BOMBA DE AMINA	13B314	
	BOMBA Nº1 SEPARADOR 1	974B301	GOULDS 3996 2x 3-13
	BOMBA Nº2 SEPARADOR 1	974B302	GOULDS 3996 2x 3-13
	BOMBA 1 SATURACIÓN	974B201	GOULDS 3196 1x 2-10
	BOMBA 2 SATURACIÓN	974B202	GOULDS 3196 1x 2-10
	BOMBA P27	96B402	GOULDS 3175 3x 6-12
	BOMBA P26	96B401	GOULDS 3175 4x 6-14
	BOMBA P28 N5000	922B19	GOULDS 3333
	BOMBA 1 VACÍO CONDENSADOR	974B101	SIHI
	BOMBA 2 VACÍO CONDENSADOR	974B102	NASH

APÉNDICE E

RESULTADO DISPONIBILIDAD PARA CADA PROCESO EN EL SISTEMA DE BOMBEO

PROCESO: PREPARACIÓN DE PASTA
MOLINO 2

Código Equipo	EQUIPO	DISPONIBILIDAD ANUAL (%)									
		2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
23B112	**Bomba princ.dump chest**	99,75	99,95	99,77	99,98	99,65	99,87	100,00	100,00	100,00	100,00
23B111	**Bomba auxiliar dump chest**	99,65	99,86	99,63	99,71	99,94	99,81	100,00	100,00	100,00	100,00
23B241	**Bomba tanque de broke**	99,63	99,72	99,86	99,65	99,95	99,95	99,40	100,00	100,00	100,00
23B321-1	**Bomba agua blanca norte**	99,81	99,84	98,94	99,86	99,68	100,00	100,00	99,81	99,81	99,81
23B322-1	**Bomba agua blanca sur**	99,44	97,72	98,65	99,97	99,99	99,81	99,68	100,00	100,00	100,00
23B33	**Bomba reguladora de consistencia**	99,96	99,87	99,93	99,83	99,84	99,92	99,95	100,00	100,00	100,00
24B31	**Bomba tanque de máquina**	99,92	99,98	99,88	99,68	99,92	99,33	99,98	99,97	99,97	99,97
22B121	**Bomba de químico # 1 (Alumbre)**	99,98	99,91	99,95	99,97	99,77	99,73	99,72	100,00	100,00	100,00
22B122	**Bomba de químico # 2 (Alumbre)**	99,98	99,98	99,91	99,86	99,97	99,82	99,79	100,00	100,00	100,00
22B221	**Bomba de químico # 3 (Urea)**	99,78	99,99	100,00	99,91	99,98	99,78	100,00	100,00	100,00	100,00
22B222	**Bomba de químico # 4 (Polifloc)**	99,91	99,99	100,00	99,54	99,93	99,86	99,77	100,00	100,00	100,00
22B521	**Bomba de químico # 5 (Resina Encolante)**	99,99	99,98	99,76	99,88	99,88	99,65	99,95	99,99	99,99	99,99
22B522	**Bomba de químico # 6 (Almidón)**	99,83	99,99	99,73	99,86	99,88	99,70	100,00	100,00	100,00	100,00

PROCESO: MÁQUINA DE PAPEL MOLINO 2

CÓDIGO EQUIPO	EQUIPO	DISPONIBILIDAD ANUAL (%)								
		2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
481B111	**Bomba # 1 del Reductor del AEG**	100,00	100,00	100,00	99,97	100,00	100,00	99,98	99,88	99,89
481B112	**Bomba # 2 del Reductor del AEG**	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	99,98	99,54	99,98
483B101	**Bomba de vacío NASH # 1**	99,92	99,07	99,98	97,55	99,89	100,00	100,00	100,00	99,91
483B102	**Bomba de vacío NASH # 2**	99,83	99,91	99,91	99,04	99,98	100,00	100,00	99,91	99,95
483B103	**Bomba de vacío NASH # 3**	99,76	100,00	98,32	99,99	99,98	99,97	100,00	100,00	99,89
422B20	**Bomba alta presión a duchas (booster)**	99,91	100,00	99,84	99,65	99,93	100,00	99,93	99,93	99,93
41B111-1	**Bomba tanque de pulpa máquina**	99,94	100,00	100,00	100,00	99,86	99,80	99,99	99,54	99,99
41B21	**Bomba primaria de máquina**	99,79	99,77	99,91	100,00	100,00	100,00	100,00	99,91	99,89
41B21-1	**Bomba secundaria de máquina**	99,94	100,00	99,80	99,88	99,79	98,59	100,00	100,00	100,00
41B30	**Bomba FAN**	99,77	99,57	99,40	99,14	99,30	99,03	99,75	99,46	99,36

PROCESO: PREPARACIÓN DE PASTA
MOLINO 1

Código Equipo	EQUIPO	DISPONIBILIDAD ANUAL (%)								
		2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
84B171	**Bomba P14A**	100,00	100,00	100,00	99,36	99,88	99,66	100,00	99,91	99,95
83B60	**Bomba primaria Uniflow P05**	99,53	99,52	99,67	99,19	100,00	99,08	99,95	99,86	99,98
83B62	**Bomba primaria Posiflow P15**	99,81	99,84	99,78	100,00	99,72	99,13	99,86	99,88	99,79

PROCESO: MÁQUINA DE PAPEL MOLINO 1

Código Equipo	EQUIPO	DISPONIBILIDAD ANUAL (%)								
		2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
91B11	**Bomba P14**	99,90	99,91	99,98	99,71	99,72	100,00	99,94	99,86	99,91
922B40	**Bomba # 1 agua fresca recuperada**	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	99,98	100,00	99,51	99,91
91B13	**Bomba FAN P17**	98,44	99,51	99,40	99,31	98,79	99,22	99,75	99,49	99,84
973B70	**Bomba Sump P33**	99,99	100,00	99,88	99,87	99,66	100,00	99,98	100,00	100,00
973B10	**Bomba de vacío 7K1**	99,95	99,93	99,83	99,80	99,90	99,87	99,91	99,93	99,84
973B20	**Bomba de vacío 7K2**	99,73	99,91	99,86	99,93	99,98	100,00	100,00	99,81	100,00
973B60	**Bomba de vacío 10E**	99,66	99,90	99,91	100,00	99,66	99,91	99,63	100,00	99,78
973B50	**Bomba de vacío 10K**	100,00	100,00	99,70	99,75	100,00	99,88	99,98	99,94	100,00
973B30	**Bomba de vacío 8K1**	100,00	100,00	99,75	99,97	99,97	100,00	99,91	100,00	99,86
973B40	**Bomba de vacío 8K2**	100,00	99,97	99,75	99,97	100,00	100,00	100,00	99,98	100,00

APÉNDICE F

FORMATO CÁLCULO DE DISPONIBILIDAD DE EQUIPOS

PAPELERA NACIONAL S.A.

ANÁLISIS DE DISPONIBILIDAD

Disponibilidad = [TTDP - (TPPP + TPCP + THPF)] / TTDP

TTDP **=** Tiempo Total Disponible del período

TPPP + TPCP + THPF = (Tiempo de paros preventivos programados + Tiempo de paros preventivos programados+ Total de horas de paro por fallas)

PROCESO	EQUIPOS	DESCRIPCIÓN	Tiempo Total disponible del periodo (hrs) TTDP	Tiempo de paros preventivos programados (hrs) TPPP	Tiempo de paros Correctivos programados (hrs) TPPP	Total de horas de paro por fallas	Tiempo total de Horas de Mantto.	DISPONIBILIDAD
MÁQUINA DE PAPEL 2								
	Vacío en Máquina de Papel							
	Bomba de vacío							
	Prensa							
	Extractor de aires							
	Bomba de Lodos							
	Refinadores							

FUENTE: PAPELERA NACIONAL S.A.

APÉNDICE G

FORMATO DE CONTROL DE TIEMPOS DE OPERACIÓN / TIEMPOS DE PARADAS DE LOS EQUIPOS

PAPELERA NACIONAL S.A. Pag. # 1

Reporte de Tiempos Programados e Imprevistos

Fecha de Emisión : 15/06/2007

Unidad de Producción : **Molino I**

Sección : **Máquina de Papel**

Fecha : **01/01/2005**

Descripción	Inicio	(hh:mm) Término	T. Improd.	O/P-Item-Gramaje	Observación	Jefe de Turno	Turno
Programados - Feriados	04 : 00	12 : 00	08 : 00	831-2 CORMED 146	Ninguna	Ing. Freddy Chancay	04h00 - 12h00
Programados - Feriados	12 : 00	20 : 00	08 : 00	831-2 CORMED 146	Ninguna	Ing. Freddy Chancay	04h00 - 12h00
Programados - Feriados	20 : 00	04 : 00	08 : 00	831-2 CORMED 146	Ninguna	Ing. Freddy Chancay	04h00 - 12h00
	Total del	**01/01/2005**	**24 : 00**	:			

Fecha : **02/01/2005**

Descripción	Inicio	(hh:mm) Término	T. Improd.	O/P-Item-Gramaje	Observación	Jefe de Turno	Turno
Tiempos Improductivos - Mecánico - Bandas	03 : 26	03 : 42	00 : 16	831-2 CORMED 146	ROTURA DE HOJA POR SALIRSE BANDA DE PRIMERA PRENSA SE PARA A	Ing. Freddy Chancay	20h00 - 04h00
Programados - Feriados	04 : 00	08 : 48	04 : 48	829-4 CORMED 146	se arranca máquina luego de llenar los tanques de pulpa por efecto de feriado	Ing. Marco Sandoval	04h00 - 12h00
Tiempos Improductivos - Método-Tiro	09 : 50	09 : 55	00 : 05	829-4 CORMED 146	corte de hoja en las prensas por tiro tensado	Ing. Marco Sandoval	04h00 - 12h00
Tiempos Improductivos - Mecánico - Bandas	09 : 55	10 : 20	00 : 25	829-4 CORMED 146	se para la máquina por salirse banda de la 1era prensa	Ing. Marco Sandoval	04h00 - 12h00
Tiempos Improductivos - Mecánico - Bandas	11 : 54	12 : 00	00 : 06	829-4 CORMED 146	se para la máquina por salirse banda de la 1era prensa	Ing. Marco Sandoval	04h00 - 12h00
Tiempos Improductivos - Maquinaria - Mantenimiento Mecán	12 : 00	12 : 34	00 : 34	831-2 CORMED 146	Máquina en proceso de arranque luego de haber colocado banda de la primera pr	Ing. Roberto Moreno	12h00 - 20h00
Tiempos Improductivos - Maquinaria - Mantenimiento Mecán	13 : 29	14 : 17	00 : 48	831-2 CORMED 146	Se pára la máquina para colocar banda de la primera prensa, se sale por dos ocas	Ing. Roberto Moreno	12h00 - 20h00
Tiempos Improductivos - Maquinaria - Mantenimiento Mecán	16 : 13	16 : 43	00 : 30	831-2 CORMED 146	Se pára la máquina para colocar banda de la primera prensa.	Ing. Roberto Moreno	12h00 - 20h00
Tiempos Improductivos - Mecánico - Bandas	20 : 46	21 : 12	00 : 26	831-2 CORMED 146	ROTURA DE HOJA POR SALIRSE BANDA DE 1ERA PRENSA SE PARA AEG F	Ing. Freddy Chancay	20h00 - 04h00
	Total del	**02/01/2005**	**07 : 58**	:			

Fecha : **03/01/2005**

Descripción	Inicio	(hh:mm) Término	T. Improd.	O/P-Item-Gramaje	Observación	Jefe de Turno	Turno
Tiempos Improductivos - Materia Prima e Insumos - Impureza	01 : 38	01 : 50	00 : 12	833-2 EXTENS 95	SE DESPRENDE IMPUREZA DE REGLA LATERAL LADO TRANSMISION Y RC	Ing. Freddy Chancay	20h00 - 04h00
Tiempos Improductivos - Materia Prima e Insumos - Impureza	06 : 09	06 : 26	00 : 17	831-2 CORMED 146	del rodillo de transferencia del couch	Ing. Marco Sandoval	04h00 - 12h00
Programados - Ventas	08 : 38	11 : 08	02 : 30	831-2 CORMED 146	parada de máquina para cambio de papel a ext 95 g/m2	Ing. Marco Sandoval	04h00 - 12h00
Tiempos Improductivos - Maquinaria - Mantenimiento Eléctri	11 : 08	12 : 00	00 : 52	831-2 CORMED 146	chequeando unidad clupak	Ing. Marco Sandoval	04h00 - 12h00
Tiempos Improductivos - Maquinaria - Mantenimiento Eléctri	12 : 00	14 : 00	02 : 00	833-3 EXTENS 95	Revisión de sistema eléctrico y seguro de corte de hoja de esta unidad.	Ing. Roberto Moreno	12h00 - 20h00
Programados - Ventas - Arranque de Máquina por cambio de	14 : 00	14 : 22	00 : 22	833-3 EXTENS 95	Arranque de máquina se comienza a producir papel extensible 95 g/m2.	Ing. Roberto Moreno	12h00 - 20h00
Tiempos Improductivos - Materia Prima e Insumos - Impureza	13 : 04	20 : 00	00 : 56	833-3 EXTENS 95	Se para la máquina para realizar limpieza de brea en la tela	Ing. Roberto Moreno	12h00 - 20h00
	Total del	**03/01/2005**	**07 : 09**	:			

APÉNDICE H

Carta de Identificación de averías típicas en las Bombas

Problema	Causa	Solución
La bomba no puede funcionar	Fusible dañado	Reemplazar fusible dañado
	Dispositivo térmico de sobrecarga abierto en el arrancador	Resetear
	Cable roto	Localizar y reparar
	Voltaje bajo	Determinar la razón (Sistema eléctrico puede ser inadecuado)
	Línea de descarga bloqueada	Remover masa bloqueante
	Líquido congelado en la bomba	Descongelar
La bomba no puede entregar la capacidad seleccionada	Hambruna en la succión	Reemplace la tubería de succión por una mas grande o incremente la cabeza de succión
	Tubería con agujeros en la succión	Reparar o reemplazar tubería defectuosa
	Altura de succión excesiva	Reorganice la localización de los equipos para reducir la altura de succión
	Líquido cercano al punto de evaporación	Disminuya la temperatura o incremente la presión de succión
	Capacidad ajustada incorrectamente	Ajustar correctamente
	Empaquetaduras averiadas	Ajustar o reemplazar empaquetaduras
	Bomba operando a una velocidad incorrecta	Revisar la línea de voltaje y la frecuencia y comparar la indicada en la placa de identificación del motor
	Asientos de válvula gastados o sucios, o ambos	Limpiar o reemplazar
	Viscosidad del liquido muy alta	Reducir la velocidad por calentamiento u otras maneras
		Incrementar el tamaño de la tubería de succión
		Incrementar la presión de succión

Problema	Causa	Solución
La bomba entrega fluido irregularmente	Tubería de succión está averiada	Reparar o reemplazar tubería
	Empaquetaduras averiadas	Reparar o reemplazar empaquetaduras
	Asientos de válvulas gastados o sucios	Limpiar o reemplazar
	Estrangulación excesiva de las válvulas de bola	Limitar estrangulación a la tolerancia del fabricante
	Presión de solución insuficiente	Incrementar la presión de succión 1)Incremente el nivel del tanque 2)Presurice el tanque de succión
	Líquido cercano al punto de evaporación	Reduzca la temperatura o incremente la presión de succión
El motor se sobrecalienta	Suministro de potencia no es la indicada para el motor	Compare el suministro de potencia con la indicada en la placa de identificación del motor
	Sobrecarga causada por operación de la bomba por encima de la capacidad indicada	Revise las condiciones de operación y compárelas con las especificaciones del fabricante de la bomba
	Empaquetaduras pegadas o lubricadas incorrectamente	Reajustar empaquetaduras y lubricar si es necesario
	Mecanismo de operación de la bomba no están lubricados correctamente	Revisar todos los puntos de lubricación
	Desalineación mecánica	Revisar la alineación de todas las partes
Ruido o golpeteo repetido con cada movimiento	Cavitación (Hambruna de la bomba)	1) Examine la tubería de succión por obstrucción en la tubería o válvulas en la succión 2) Revisar el valor de NPSH disponible en el sistema