



UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ

**ANÁLISIS DE VIBRACIONES MECÁNICAS DEL REFINADOR
PRIMARIO EN LA PLANTA DE PULPA DE PAPELES VENEZOLANOS C.A
MEDIANTE EL MÉTODO DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO BASADO
EN LA CONFIABILIDAD (MPBC)**

Autores:

Salcedo C. Cristóbal R.

Rondón R. José R.

Urb. Yuma II, calle N° 3. Municipio San Diego
Teléfono: (0241) 8714240 (master) – Fax: (0241) 871239



**REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**ANÁLISIS DE VIBRACIONES MECÁNICAS DEL REFINADOR
PRIMARIO EN LA PLANTA DE PULPA DE PAPELES VENEZOLANOS
C.A MEDIANTE EL MÉTODO DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO
BASADO EN LA CONFIABILIDAD (MPBC)**

Proyecto del Trabajo de Grado para optar al título de
INGENIERO MECÁNICO

Autores:

Salcedo C. Cristóbal R

C.I. 27097200.

Rondón R. José R.

C.I. 25110303

Tutor:

Ing. Luis Ortega

C.I. 3.476.801

San Diego, agosto de 2021.



FI-M -004-2021-ICR (TG)

Valencia, 23 de julio de 2021

Ciudadanos:
Rondón R., José R.
25.110.303
Salcedo C., Cristóbal R.
27.097.200
Presente-

Cumplo con informarle que la Comisión de Trabajo de Grado y Pasantías de la Facultad de Ingeniería en su reunión N° 03-2021 de fecha 26-05-2021 aprobó el proyecto de trabajo de grado titulado **ANÁLISIS DE VIBRACIONES MECÁNICAS DEL REFINADOR PRIMARIO EN LA PLANTA DE PULPA DE PAPELES VENEZOLANOS C.A MEDIANTE EL MÉTODO DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO BASADO EN LA CONFIABILIDAD (MPBC)**, presentado por usted (es) como requisito para optar al título de Ingeniero Mecánico.

Se ratifica la designación del Ing. Luis Ortega C.I: 3.476.801 como Tutor Académico que los asesorara en el desarrollo de este proyecto.

Atentamente,

Dr. Francisco Gelanzé Sevilla.
Decano



c.c. Coordinación de Pasantías y Trabajo de Grado (1).

FG/a.a.



REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**CONSTANCIA DE APROBACIÓN PARA LA PRESENTACIÓN PÚBLICA
DEL TRABAJO DE GRADO**

Quien suscribe, Ing. Luis Ortega, portadora de la cédula de identidad N° 3.476.801, en mi carácter de tutor del trabajo de grado presentado por los ciudadanos Salcedo C. Cristóbal R. C.I. 27.097.200 y Rondón R. José R. C.I: 25.110.303 titulado **ANÁLISIS DE VIBRACIONES MECÁNICAS DEL REFINADOR PRIMARIO EN LA PLANTA DE PULPA DE PAPELES VENEZOLANOS C.A MEDIANTE EL MÉTODO DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO BASADO EN LA CONFIABILIDAD (MPBC)** presentado como requisito parcial para optar al título de **INGENIERO MECÁNICO**, considero que dicho trabajo reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación pública y evaluación por parte del jurado examinador que se designe.

En San Diego, a los 6 días del mes de agosto del año dos mil veintiuno.

Ing. Luis Ortega
C.I. 3.476.801

DEDICATORIA

En primer lugar, quiero dedicarles el presente trabajo a mis padres, la economista Soranyi Campos y el ingeniero civil Cristóbal Salcedo, quienes fueron mis pilares en el camino recorrido para llegar al punto de presentar y con orgullo dedicar este proyecto.

CRISTOBAL SALCEDO

Este trabajo especial de grado para optar por el título de ingeniero mecánico se lo dedico a mi madre Adriana Isabel Rozo Palacios por estar siempre a mi lado y acompañarme en los tiempos difíciles, para así cumplir mi meta

JOSÉ RONDÓN

AGRADECIMIENTOS

En primera instancia, quiero agradecerle a Dios por darme la salud, los padres y proveerme de todas las posibilidades en mi vida, las cuales me llevaron en este camino, el cual en este momento puedo presentar nuestro trabajo de grado.

En segundo lugar, agradecerles a mis padres por ser pieza crucial en lo que fue toda la carrera con su apoyo incondicional de todas las maneras posibles y si impulso y motivación en los momentos que más lo necesitaba. Por ser mis guías, mis consultores y tutores y por infinidad de roles que tomaron, que no pudiera completar en esta página, les agradezco.

En tercer lugar, quiero agradecerle a mis hermanos y mi familia en general por ser un apoyo y fuente de motivación y alegría, dándome así, ánimos para seguir adelante en momentos difíciles.

En cuarto lugar, agradezco mucho el apoyo de mi novia Katherine Baptista, persona que ya es parte de mi familia y junto a ellos me ha prestado su apoyo incondicional y gran apoyo sentimental en los puntos de quiebre al tomar decisiones.

En quinto lugar, quiero expresar un gran agradecimiento a el Ing. Hernán Cortez, el cual fue una ayuda y un apoyo que tuvo con nosotros aun cuando ya la investigación no era su responsabilidad se comprometió con nosotros y poco es nombrarlo en esta sección como parte del agradecimiento que tenemos hacia él.

Como último punto quisiera agradecerles a todas las personas que me aprecian y estuvieron al pendiente de todo mi proceso en la concreción del trabajo a presentar, personas las cuales considero especiales y pertenecen a distintas partes de mi círculo social como lo es el ámbito laboral el residencial y jovial.

CRISTOBAL SALCEDO
AGRADECIMIENTOS

A Dios todo poderoso por estar siempre a mi lado en toda mi vida.

A mi mamá Adriana Isabel Rozo Palacios por su cariño y apoyo en todo momento.

A mi papá José Luis Rondón Monsalve por apoyarme con toda la información necesaria para mi trabajo de grado.

Al Ing. Hernán Cortez por acompañarnos y apoyarnos en todo.

A mi novia Mariangel Torrens por estar a mi lado en los momentos difíciles.

A mis compañeros de casi toda la vida por estar pendientes ante cualquier duda o problema que se fuera presentando.

A la Universidad José Antonio Páez por brindar tan excelentes profesores que me capacitaron para llegar preparado a este nivel de aprendizaje.

JOSÉ RONDÓN

ÍNDICE

CONTENIDO

Pg

ÍNDICE DE FIGURA.....	ix
ÍNDICE DE CUADRO.....	x
RESUMEN.....	xi
INTRODUCCIÓN.....	1

CAPÍTULO

I EL PROBLEMA

1.1 Planteamiento del Problema.....	3
1.2 Formulación.....	4
1.3 Objetivos de la Investigación.....	4
1.3.1 Objetivo General.....	4
1.3.2 Objetivos específicos.....	4
1.4 Justificación.....	5
1.5 Alcance.....	6
1.6 Limitaciones.....	6

II MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes.....	7
2.2 Bases Teóricas.....	8
2.2.1 Las vibraciones.....	8
2.2.2 Instrumentación en mediciones por vibración.....	13
2.2.3 Defecto en pista.....	13
2.2.4 Medidas de vibraciones.....	15
2.2.5 Clasificación por grupos ISO 10816-1.....	21
2.2.6 Clasificación por grupos ISO 10816-3.....	22
2.2.7 Clasificación de condiciones de maquinaria.....	23
2.2.8 Cuadros de diagnóstico de vibraciones.....	24
2.2.9 Propiedades Estadísticas de Señales de Vibración.....	36
2.2.10 Clasificación para la evaluación vibratoria según la Norma ISO 10816.....	37
2.2.11 Aceleración Envolvente.....	38
2.2.12 Ventajas del análisis por vibración.....	38
2.2.13 Desventajas del análisis por vibración.....	38
2.2.14 El mantenimiento.....	39
2.2.15 Historia del mantenimiento.....	40
2.2.16 Evolución del mantenimiento.....	40
2.2.17 Tipos de mantenimientos.....	41
2.2.18 Refinador Primario.....	50
.....	
2.3 Bases legales.....	52
2.4 Definición de términos.....	54

III MARCO METODOLÓGICO	
3.1	Tipo de la Investigación..... 56
3.2	Diseño de Investigación..... 56
3.3	Nivel de la Investigación..... 57
3.4	Población y Muestra..... 57
3.5	Técnica e instrumentos de recolección de datos..... 58
3.5.1	Instrumentos de recolección de datos..... 59
3.6	Fases Metodológicas..... 59
IV RESULTADOS	
4.1	Estudiar las diferentes técnicas de análisis de fallas usadas en el método de Mantenimiento Predictivo Basado en la Confiabilidad (MPBC)..... 62
4.2	Determinar los distintos modos de falla que se presentan en el refinador primario..... 63
4.2.1	Medición..... 63
4.2.2	Toma de datos..... 64
4.3	Evaluar los parámetros de funcionamiento requeridas por la compañía..... 68
4.3.1	Resultados..... 68
4.4	Elaborar el informe técnico sobre el resultado de los análisis de vibraciones del refinador primario aplicando el método de MPBC..... 75
4.5	Proponer las acciones correctivas según el tipo de modo de falla de acuerdo a los parámetros exigidos por el fabricante del equipo, establecidas en las Normas..... 82
	CONCLUSIONES 84
	RECOMENDACIONES 86
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 88
ANEXOS	
A	Vibraciones complejas

ÍNDICE DE FIGURA

FIGURA	Pág
1	Ejemplo de diferentes equipos y su vibración axial..... 11

2	Fallos en la pista exterior.....	13
3	Fallos en la pista exterior.....	14
4	Nivel RPC	15
5	Concepto de fase.....	16
6	Unidades de amplitud.....	17
7	Planos de estudio.....	18
8	Puntos de apoyo vista lateral.....	19
9	Puntos de apoyo vista de planta.....	19
10	Criterios de evaluación según estándar ISO 10816-1.....	21
11	Criterios de evaluación según estándar ISO 10816-3.....	23
12	Criterios de severidad para aceleración envolvente.....	24
13	Distribución de la probabilidad de Gauss.....	36
14	Tipo de mantenimiento según la época.....	41
15	Disposición de los elementos en un disco refinador.....	51
16	Esquema de la norma OHSAS.....	52
17	SKF microlog serie GX-CMXA-75.....	63
18	Esquema de puntos de apoyo del refinador primario de PAVECA.....	64
19	Esquema posicionamiento correcto del acelerómetro.....	65
20	Diagrama de Ishikawa “Espina de Pescado.....	66

CUADROS

	Pág
1	24
Diagnóstico/desbalanceo.....	
2	25
Diagnóstico/desalineación.....	
3	26
Diagnóstico/flecha con flexión.....	
4	27
Diagnóstico/problemas de rodamientos con gorriones.....	
5	28
Diagnóstico/ problemas de rodamientos con elemento rodantes.....	
6	30
Diagnóstico/holgura mecánica.....	
7	31
Diagnóstico/problemas de motor eléctrico.....	
8	32
Diagnóstico/problemas de bomba.....	
9	33
Diagnóstico/problema de turbina.....	
10	33
Diagnóstico/problema de ventiladores.....	
11	34
Diagnóstico/problemas de compresor.....	
12	34
Diagnóstico/problemas de bandas.....	
13	35
Diagnóstico/problema de engranes.....	
14	67
Imágenes de las tomas de datos.....	
15	70
Resumen de los datos.....	

16	Imágenes del mantenimiento correctivo realizado al refinador.....	78
17	Proyecciones de las bancadas.....	81

ÍNDICE DE GRÁFICO

GRÁFICO		Pp
1	Lineal bancada 1. Amplitud (mm/s) – Tiempo.....	69
2	3D bancada 1. Amplitud (mm/s) – Tiempo.....	69
3	Lineal bancada 2. Amplitud (mm/s) – Tiempo.....	70
4	3D bancada 2. Amplitud (mm/s) – Tiempo.....	70
5	Lineal bancada 3. Amplitud (mm/s) – Tiempo.....	71
6	3D bancada 3. Amplitud (mm/s) – Tiempo.....	71
7	Lineal bancada 4. Amplitud (mm/s) – Tiempo.....	72
8	3D bancada 4. Amplitud (mm/s) – Tiempo.....	72
9	Aceleraciones envolventes de cada bancada (Ge) – Tiempo.....	73
10	Curvas de tendencia de las posiciones H y V de la bancada 2....	78
11	Curvas de tendencia de las posiciones H y V de la bancada 4....	80
12	Cuerva de tendencia de posición crítica Ax Bancada 1.....	82
13	Gráfica 13. Cuervas de tendencias Bancada 1.....	87
14	Gráfica 14. Cuervas de tendencias Bancada 2.....	87
15	Gráfica 15. Cuervas de tendencias Bancada 3.....	88
16	Gráfica 16. Cuervas de tendencias Bancada 4.....	88



REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

ANÁLISIS DE VIBRACIONES MECÁNICAS DEL REFINADOR PRIMARIO EN LA PLANTA DE PULPA DE PAPELES VENEZOLANOS C.A MEDIANTE EL MÉTODO DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO BASADO EN LA CONFIABILIDAD (MPBC)

Autor: Rondón Rafael, Salcedo Cristóbal

Tutor: Ing. Luis Ortega

Fecha: Agosto, 2021

RESUMEN

La empresa PAVECA (papeles Venezolanos C.A) que se encuentra ubicada en la Zona Industrial el Tigre en el municipio Guacara. Actualmente presenta fallas significativas a nivel de maquinaria, como lo son, el desgaste de los componentes internos de los mismos, desalineación entre ejes, fallas en los ensayos no destructivos por grietas y discos. El cual conduce a una disminución de producción de papel higiénico, servilletas, toallines, entre otras discontinuidades en el material y muchos daños en las maquinarias por falta de los componentes originales de fábrica, lo que trae como consecuencia pérdidas económicas. Es por ello que la presente investigación tuvo como objetivo proponer un análisis de vibraciones mecánicas del refinador primario, mediante el mantenimiento predictivo basado en la confiabilidad (MPBC). El estudio fue de tipo de proyecto factible, se fundamentó en un diseño de investigación de campo y documental, con un nivel de investigación descriptivo. Los objetivos planteados se desarrollaron utilizando técnicas e instrumentos de recolección de datos como son la revisión documental la bibliográfica y la observación directa.

Descriptores: Análisis, vibraciones, mantenimiento, confiabilidad

INTRODUCCIÓN

PAVECA es una de las grandes empresas de Venezuela que tiene como finalidad la fabricación, conversión y comercialización de productos de cuidado personal con la más alta calidad y estándares del mercado. Como todas las empresas deben tener un plan de mantenimiento industrial para el monitoreo y productividad de los mismos. A pasar de los años se han visto afectados estos equipos debido a muchos factores, como lo es la crisis económica, falta de personal y especialistas por la emigración. Esto trae consecuencias directamente al daño de las maquinas por falta de mantenimiento o si es necesario el reemplazo de las que ya cumplieron su vida útil.

Sin embargo, no todas las empresas cuentan con planes de mantenimiento, como es el caso de la empresa PAVECA (papeles Venezolanos C.A), ubicada en la Zona Industrial el Tigre en el municipio Guacara, la cual se encarga de la fabricación de papel higiénico, servilletas, toallines, entre otros. Esta empresa está presentando las siguientes fallas: desgaste entre los componentes internos de las máquinas desalineación entre ejes, fallas en los ensayos no destructivos por grietas y discontinuidades en el material y muchos daños en las maquinarias por falta de los componentes originales de fábrica, lo que trae como consecuencia pérdidas económicas.

Por consiguiente, nuestro trabajo de investigación está destinado a la necesidad de un plan de mantenimiento preventivo para buscar el aumento de la mantenibilidad de los activos, generando registros en cada intervención realizada, manejando un control periódico para futuras inspecciones anticipándose a posibles fallas. Del mismo modo, la presente investigación se desglosará de la siguiente manera:

En el **Capítulo I: El Problema**, se planteó el problema para el desarrollo de la presente investigación, así como los objetivos y la justificación, alcance y limitaciones del estudio describiendo la actual problemática en la empresa PAVECA.

En el **Capítulo II: Marco Teórico**, se tomó en consideración los antecedentes de la investigación y las bases teóricas que servirán de aportes, así como la definición de los términos básicos que fundamentan la presente investigación. El **capítulo III: Marco Metodológico**, el cual cuenta con el tipo, diseño y nivel de la investigación, así como con la población y muestra, técnicas de recolección de datos y las fases metodológicas, y por último el **Capítulo IV**, los resultados, conclusiones y recomendaciones.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

1.1 Planteamiento del problema

Cuando se habla de una empresa productora, el equipo que utiliza para su línea de producción, siendo este de gran importancia para la misma, debe cumplir con ciertos requerimientos para que dicho equipo pueda trabajar en condiciones óptimas, por lo que, mediante revisiones constantes, lo cual implica mantenimientos continuos, ya que con el tiempo se van deteriorando los componentes generando vibraciones en los equipos, desalineaciones, fracturas en el componente, de los cuales están hechos y hasta explosiones de los equipos, debido al constante funcionamiento que ellos tienen de producción de materia prima que es llevada a los comercios, industrias y hasta para los hogares, estableciendo paros prolongados de las industrias, creando pérdidas por paro de fabricación muy elevadas que pueden afectar a las compañías gravemente hasta el punto de quiebre del mismo.

Como es el caso de la empresa PAVECA (papeles Venezolanos C.A), ubicada en la Zona Industrial el Tigre en el municipio Guacara, la cual se encarga de la fabricación de papel higiénico, servilletas, toallines, entre otros. Esta empresa está presentando las siguientes fallas: desgaste entre los componentes internos de las máquinas desalineación entre ejes, fallas en los ensayos no destructivos por grietas y discontinuidades en el material y muchos daños en las maquinarias por falta de los componentes originales de fábrica, lo que trae como consecuencia pérdidas económicas.

Entre las variables generadoras de estas fallas se encuentran la crisis económica por la que atraviesa el país, el alto grado de inflación y esto no permite que se puedan sustituir muchas de las maquinarias que ya cumplieron con su vida útil, por los precios, falta de personal, falta de mano de obra calificada, muchos técnicos especializados han emigrado del país debido a esta crisis, por lo cual hay que traer gente especializada que se encuentra en otros países, lo que genera mucho dinero por

viáticos y resulta más fácil contratar personal con poca experiencia a elaborar el trabajo, creando paros en la empresa por daño en las máquinas y falta de materiales de trabajo. Como se sabe, Venezuela está pasando por una situación bastante crítica, la cual está llevando a que muchas de las empresas del país, debido a los problemas antes mencionados, llegue a dejar de funcionar, producir, generar y hasta ayudar a otras empresas las cuales dependen de ellas mismas, ocasionando que la materia prima y los productos de primera necesidad lleguen a la escases, de tal manera que la convivencia en el país sea difícil y por falta de los nutrientes básicos para el organismo humano, el poco personal calificado para este tipo de mano de obra, cometa errores sencillos generando una vida poco útil para las maquinarias de las empresas.

1.2 Formulación del problema

¿Cómo se puede predecir las posibles fallas del funcionamiento del refinador primario en la empresa Papeles Venezolanos C.A. (PAVECA)?

1.3 Objetivos de la investigación

1.3.1 Objetivo general

Proponer un análisis de vibraciones mecánicas para predecir el estado de funcionamiento del refinador primario de PAVECA a través del método de Mantenimiento Predictivo Basado en Confiabilidad (MPBC).

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Estudiar las diferentes técnicas de análisis de fallas usadas en el método de Mantenimiento Predictivo Basado en la Confiabilidad (MPBC).
2. Determinar los distintos modos de falla que se presentan en el refinador primario.
3. Evaluar los parámetros de funcionamiento requeridas por la compañía.
4. Elaborar el informe técnico sobre el resultado de los análisis de vibraciones del refinador primario aplicando el método de MPBC.
5. Proponer las acciones correctivas según el tipo de modo de falla de acuerdo a los parámetros exigidos por el fabricante del equipo, establecidas en las Normas.

1.4 Justificación de la investigación

Todas las máquinas eléctricas vibran debido al movimiento rotacional de su eje y a la tolerancia que existe entre sus componentes. Las vibraciones deben de estar en valores constantes, es decir que tiene que estar en los valores que indica las normas ISO 10816-1 y ISO 10816-3 para el análisis de vibración y el criterio de severidad para aceleración envolvente para los pico energías o también llamados gE de cualquier tipo de equipo, tanto industrial como casero, pero debido al deterioro de estos componentes la magnitud de la vibración aumenta con el tiempo y los componentes del equipo se van desgastando debido al continuo funcionamiento que este posee y los componentes deben de ser reemplazados antes de que ocurra la destrucción total de uno de ellos y con ello el paro total de la producción.

Debido a que, por falta de materia prima y mano de obra calificada los materiales para la conservación de los equipos son pobres y más costosos, ya que hay que traer los componentes de los equipos de otros países. Todas las máquinas de la empresa PAVECA son importantes porque cada una de ellas cumple un rol en la elaboración del producto, pero el equipo esencial para la producción de materia prima es el refinador primario ya que este refina la materia prima con la cual se elabora los papeles que pasan por el resto de las máquinas para terminar el proceso de fabricación y llevarlo al mercado para el uso de las personas en el país que depende de esos productos básicos para su vida diaria resultando muy difícil la adquisición de estos productos por los costos tan elevados que estos conllevan.

Por ello, el análisis de vibraciones mecánicas es una de las técnicas modernas de monitoreo de la condición de las máquinas, tanto rotativas como alternativas, que permite determinar un estado o condición real de estas. La aplicación de esta tecnología es uno de los sistemas de mantenimiento modernos que operan bajo la filosofía de confiabilidad operacional, es decir, permite detectar fallas que podrían impactar la operación y la producción de la empresa mucho antes de que estas ocurran, haciendo un uso coherente, eficiente y eficaz de los recursos (económicos, humanos, entre otros).

1.5 Alcance

Este proyecto de investigación busca diagnosticar, predecir y resolver a través del Mantenimiento Predictivo Basado en Confiabilidad (MPBC), los fallos que presenta el refinador primario ubicado en planta de pulpa de Papeles Venezolanos C.A (PAVECA), ubicado en la Zona Industrial el Tigre en Guacara, ayudando a mejorar y aumentar el tiempo de vida útil del equipo.

1.6 Limitaciones

Las limitaciones se basan en el área de planta de pulpa de PAVECA donde se va a realizar el análisis de vibraciones mecánicas, dificultad del medio de transporte por falta de gasoil en el país y espera de la empresa para la autorización de entrada para la inspección del refinador primario. Por otro lado, el Mantenimiento Predictivo Basado en Confiabilidad del Refinador Primario de PAVECA, será el objetivo, por lo que se descarta cualquier otro tipo de equipo en esta investigación.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

González, J (2016), realizo su trabajo de grado titulado **“Propuesta de Mantenimiento Preventivo y Planificado para la Línea de Producción en la Empresa Latercer S.A.C”** para optar por el título de Ingeniero Mecánico en la Universidad de Católica Santo Toribio de Mogrovejo, Chiclayo, Perú. El autor citado plantea como objetivo general una propuesta de mantenimiento preventivo y planificado con la finalidad de lograr la máxima eficiencia de las máquinas, optimizando la producción con el adecuado mantenimiento que se les realice, además de un correcto mantenimiento preventivo que reduce las paradas no planificadas que conllevan a la pérdidas de tiempo, reduce materia prima que se malogra por estas paradas, elevando de este modo el nivel de competitividad al ser más continuo su proceso donde la empresa se ve beneficiada del aumento de su producción.

Gracias al estudio explicado de Jorge González, se recopilo la información teorica sobre los tipos de mantenimiento, que es el mantenimiento, historia del mantenimiento, ventajas y desventajas que nos presentan los distintos tipos de mantenimiento lo cual fue informáticamente utilizado para el desarrollo de esta investigación.

Así mismo, Flores, Henrique (2020). en su trabajo titulado **Evaluación mediante vibraciones de los rodamientos de la transmisión de un prototipo mini Baja SAE**, realizado en la universidad de Carabobo, con el fin de realizar medición y obtención de datos de las frecuencias de falla para cada rodamiento del sistema de transmisión. Así mismo, se realizó una guía en la cual las frecuencias que generan los rodamientos

deterioro de la pista exterior de un rodamiento es físicamente el número de bolas o rodillos que pasan por un punto de la pista exterior cada vez que el eje realiza un giro completo (Enrique Flores, 2020).

Este proyecto de investigación utilizó conceptos básicos necesarios para el desarrollo del mismo sobre el trabajo de grado de Enrique Flores, el cual se extrajo la información de las clasificaciones ISO 10816-3 y el criterio de severación envolvente para el estado y condición en la que se encuentra la máquina y los rodamientos y cojinetes del mismo, así como también los armónicos de la lectura de vibración de los rodamientos con sus posibles fallas.

Por último, Yépez, H. (2016) desarrollo un trabajo especial de grado para optar por el título de ingeniero mecánico de la universidad José Antonio Páez, titulado: **“Rediseño del plan de mantenimiento preventivo de una línea de envasado de la empresa C.A Venezolana de pinturas”** el objetivo de este trabajo consiste en la adopción de un programa de mantenimiento preventivo de los equipos en la industria, es una estrategia clave para mejorar la competitividad de las empresas y también para alcanzar objetivos que de otro modo serian difíciles de conseguir al cliente, seguridad y normativas vigentes aplicables), sin embargo no todas las empresas cuentan con este servicio como es el caso de la empresa de Venezolana de Pinturas C.A.

Es por esto que la presente investigación realiza el rediseño ya que fue necesario diagnosticar la situación del mantenimiento de los equipos de la línea de envasado y analizar las causas que generan contratiempos en la ejecución del mantenimiento preventivo de los mismos. Seguidamente establecer cuál es la etapa de mayor importancia y cuáles son los equipos involucrados considerados como críticos.

2.2 Bases teóricas.

2.2.1 Las vibraciones

Vibración simple

La vibración simple tiene como principal base las ondas sinusoidales en el dominio del tiempo, siendo las oscilaciones puras la representación de ellas. Las

unidades más utilizadas son periodo de oscilación que es la representación de un ciclo, periodo, y frecuencia que es la recíproca de periodo, generalmente representada en (ciclos por segundo) (A-MAQ, 2005).

Por otro lado, (Glen White, 1990-2010), dice “En su forma más sencilla, una vibración se puede considerar como la oscilación o el movimiento repetitivo de un objeto alrededor de una posición de equilibrio. La posición de equilibrio es la a la que llegará cuando la fuerza que actúa sobre él sea cero. Este tipo de vibración se llama vibración de cuerpo entero, lo que quiere decir que todas las partes del cuerpo se mueven juntas en la misma dirección en cualquier momento”. Además, este autor resalta de igual manera que “El movimiento vibratorio de un cuerpo entero se puede describir completamente como una combinación de movimientos individuales de 6 tipos diferentes. Esos son traslaciones en las tres direcciones ortogonales x, y, y z, y rotaciones alrededor de los ejes x, y, y z. Cualquier movimiento complejo que el cuerpo pueda presentar se puede descomponer en una combinación de esos seis movimientos. De un tal cuerpo se dice que posee seis grados de libertad. Por ejemplo, un barco se puede mover desde adelante hacia atrás (ondular) desde abajo hacia arriba y de babor hacia estribor. También puede rodar en el sentido de la longitud (rodar), girar alrededor del eje vertical, (colear) y girar alrededor del eje babor-estribor (arfar)”

Vibraciones mecánicas

En esta definición de vibración mecánica se habla de sistema o cuerpo ya que si un cuerpo no tiene la característica de vibrar se puede unir a otro y formar un sistema vibratorio; por ejemplo, en un sistema resorte- masa, la masa posee características energéticas cinéticas y el resorte características restauradoras. Es necesario poner claro que para que un sistema vibre es necesario que posea por lo menos un elemento inercial (energía cinética) y un restaurador (enérgico potencial). Aunque en otros casos los elementos restauradores se generalizan como elementos elásticos, existen sistemas en las que no hay un elemento elástico y aun así pueden

vibrar, por ejemplo, el péndulo que se visualiza como elemento restaurador (Gutiérrez & Serna, 2014).

Movimiento armónico sencillo

Este movimiento representa el caso más sencillo de una vibración y su funcionamiento es explicado mediante un sistema resorte-masa con un grado único de libertad Glen White (1990-2010) lo explica de la siguiente manera: “Si se desplaza la masa, hasta una cierta distancia del punto de equilibrio, y después se suelta, el resorte la regresará al equilibrio. Para entonces, la masa tendrá algo de energía cinética y rebasará la posición de descanso y desviará el resorte en la dirección opuesta. Perderá velocidad hasta pararse en el otro extremo de su desplazamiento donde el resorte volverá a empezar el regreso hacia su punto de equilibrio. El mismo proceso se volverá a repetir con la energía transfiriéndose entre la masa y el resorte, desde energía cinética en la masa hasta energía potencial en el resorte, y regresando.” Sabiendo esto, a este movimiento anteriormente explicado son aplicables dos conceptos:

Periodo (T): “...es el tiempo necesario para un ciclo, o para un viaje ida y vuelta, o de un cruce del nivel cero hasta el siguiente cruce del nivel cero en la misma dirección. El periodo se mide en segundos o milisegundos dependiendo de qué tan rápido se cambie la onda”. Glen White (1990-2010).

Frecuencia (F=1/T): el mismo autor define este concepto como, “La frecuencia es el número de ciclos que ocurren en un segundo, y sencillamente es el recíproco del período”.

Vibraciones de diferentes equipos.

La vibración como definición se puede decir que es el movimiento de vaivén de una maquina o elemento de ella en cualquier sentido del espacio desde su posición de equilibrio, el llevar un seguimiento constante y estricto de las maquinarias nos da una señal previo de un daño, y disminuir costos en los cambios de piezas programados y dar mayor tiempo para que continúen trabajando, destacando más importantes

características como: frecuencia, energía de impulsos, velocidad, aceleración y desplazamiento (Torres, 2018).(ver figura 1)

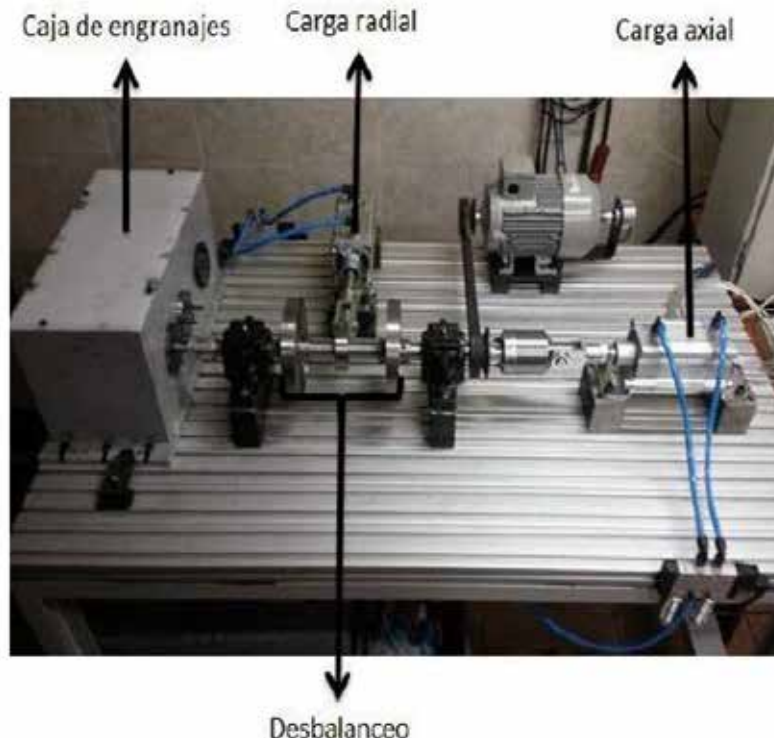


Figura 1. Ejemplo de diferentes equipos y su vibración axial.

Fuente: Niveló & Romelo, (2014)

Para más ejemplos sobre cómo se reflejan los espectros en los equipos consulte en la tabla C ubicado en los anexos A. Las señales de vibraciones están conformadas por muchas frecuencias. La cual está presente en las cargas axiales y radiales (ver figura 1) donde este proceso deteriora las señales de vibración en sus componentes independientes de frecuencia. El análisis del dominio de la frecuencia puede dar información sobre las fuentes que crean la señal. La función de frecuencia de respuesta (FRF) es la mezcla entre la salida (respuesta) y la entrada (excitación) de ese sistema (Súnico, 2015).

Vibración por lubricación inadecuada.

Una inadecuada lubricación, incluyendo la falta de lubricación y el uso de lubricantes incorrectos, puede ocasionar consecuencias de vibración en un rodamiento de chumacera. En igualdad de casos, la lubricación inadecuada causa mayor fricción entre el eje rotante y rodamiento estacionario, y dicha fricción produce vibración en el rodamiento y en las demás piezas relacionadas. Este tipo de vibración se llama "dry whip", o sea látigo seco, y es muy parecido al pasar sobre el cristal seco un dedo mojado (Álvarez, 2016).

Vibración por Aflojamiento Mecánico.

El aflojamiento mecánico y la acción de golpeteo (machacado) resultante, producen vibración a una frecuencia que a menudo es $2x$, y también múltiplos muy elevados, de las rpm. La vibración puede ser resultado de holgura excesiva en los rodamientos, de pernos de montaje sueltos, pedestal de soporte o fisuras en la estructura, también la vibración se da por aflojamiento mecánico y es generada por alguna otra fuerza de excitación, como una falta de alineamiento o desbalance. Sin embargo, el aflojamiento mecánico agranda la situación, convirtiendo cantidades relativamente pequeñas de desbalance o falta de alineamiento en amplitudes de vibración bastantes altas. Corresponde por ende decir que el aflojamiento mecánico permite que se den grandes vibraciones de las que ocurrirían de por sí, ocasionadas por otros problemas (Gutiérrez & Serna, 2014).

Vibración por Problemas de Engranaje

Las vibraciones inherentes al funcionamiento de cualquier transmisión por engranajes son ocasionadas por el error de transmisión (ET), el cual se refiere a la diferencia de la posición angular del eje de salida entre una transmisión perfecta y una transmisión real. Las vibraciones producidas por el error de transmisión tienen tiempo determinado por la frecuencia con que los dientes ingresan sucesivamente en contacto, la que es llamada frecuencia de engrane (Parra, 2016).

2.2.2 Instrumentación en mediciones por vibración

En vibraciones, el sensor es la parte del sistema que responde a una excitación externa, mientras que el transductor es el que se encarga de transformar la respuesta del sistema en una señal eléctrica. Comúnmente a el conjunto sensor/transductor se le dice simplemente sensor. La descripción formal del sensor, transductor e instrumentación está muy fuera del alcance de este proyecto, una explicación de ese tipo puede ser encontrada por ejemplo en Thomson (1982); (1980 Ogata (1987); Proakis y Manolakis (1998) entre otros. El punto es entonces mostrar informalmente la característica esencial para este proyecto del sensor: sensibilidad, y describir los tipos de transductores que son usados generalmente cuando se quiere proponer señales para su comparación con las normas (Medición, 2014).

2.2.3 Defectos en pista de rodamientos

En la pista exterior (ver figura 2 y 3) se caracterizan por tener picos armónicos de la frecuencia de deterioro de la pista exterior entre 8 y 10 armónicos de la Ball Pass Frequency Outer o frecuencia de deterioro de la pista exterior BPFO. En la pista interior los espectros demuestran algunos picos armónicos de la frecuencia de deterioro en la pista interior entre 8 y 10 armónicos de la Ball Pass Frequency Inner o frecuencia de deterioro de la pista interior (BPFI) modulado por bandas laterales a $1 \times \text{RPM}$ (Fernández, 2017).

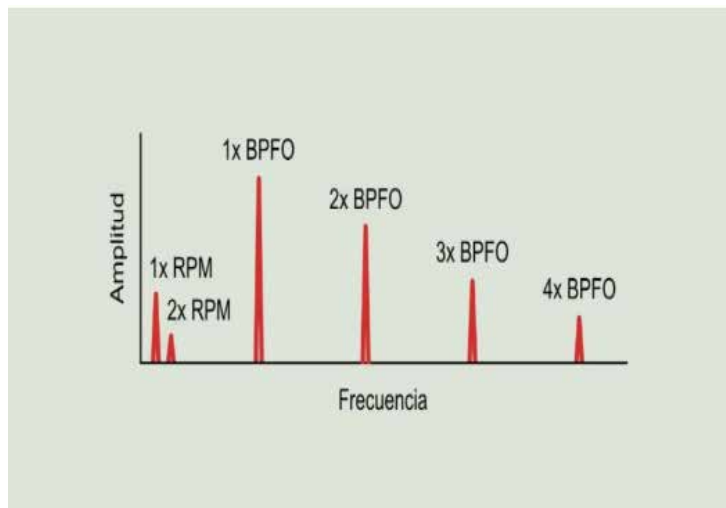


Figura 2. Fallos en la pista exterior

Fuente: Fernández (2017)

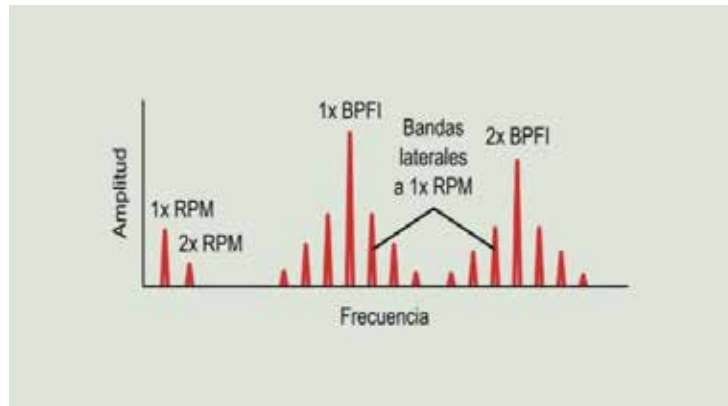


Figura 3. Fallos en la pista interior.

Fuente: Fernández (2017)

También existen espectros y frecuencias para cada una de las distintas fallas las cuales las podemos encontrar en la tabla A, C y D ubicado en los anexos A.

2.2.4 Medida de vibraciones

Medición de la amplitud de vibración

La amplitud tiene diversas maneras de medirla dependiendo de la utilización que tendrá el dato de esta para el diferente tipo de estudio que tendrá y según Glen White (1990-2010) las definiciones para estas maneras descritas son las siguientes:

Amplitud Pico (Pk) es la distancia máxima de la onda del punto cero o del punto de equilibrio.

Amplitud Pico a Pico (Pk-Pk) es la distancia de una cresta negativa hasta una cresta positiva. En el caso de una onda senoidal, el valor pico a pico es exactamente dos veces el valor pico, ya que la forma de la onda es simétrica. Pero eso no es necesariamente el caso con todas las formas de ondas de vibración.

Amplitud Raíz del Promedio de los Cuadrados (RPC) Es la raíz cuadrada del promedio de los cuadrados de los valores de la onda. En el caso de una onda senoidal el valor RPC es igual a 0.707 del valor pico, pero esto es solo válido en el caso de una onda senoidal. El valor RPC es proporcional al área abajo de la curva. Si se rectifica a los picos negativos, eso quiere decir si se les hace positivos, y el área abajo de la curva resultante está promediado hasta un nivel medio este nivel es proporcional al valor RPC. (ver figura 4)

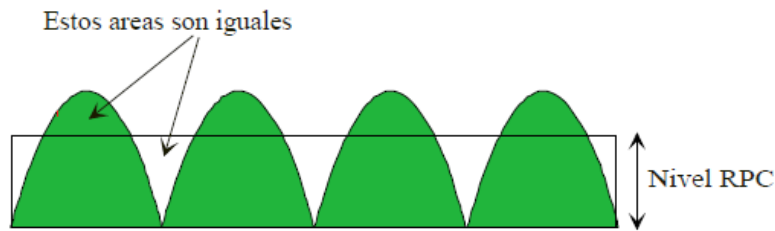


Figura 4. Nivel RPC

Fuente: Glen White (1990-2010)

Concepto de fase

Fase es una medida de la diferencia de tiempo entre dos ondas senoidales. Aunque la fase es una diferencia verdadera de tiempo, siempre se mide en términos de ángulo, en grados o radianes. Eso es una normalización del tiempo que requiere un ciclo de la onda sin considerar su verdadero periodo de tiempo. La diferencia en fase entre dos formas de onda se llama a veces el desplazamiento de fase. Un desplazamiento de fase de 360 grados es un retraso de un ciclo o de un período de la onda, lo que realmente no es ningún desplazamiento. Un desplazamiento de 90 grados es un desplazamiento de 1/4 del periodo de la onda etc.

El desplazamiento de fase puede ser considerado positivo o negativo; eso quiere decir que una forma de onda puede ser retrasada relativa a otra o una forma de

onda puede ser avanzada relativa a otra. Esos fenómenos se llaman atraso de fase y avance de fase respectivamente. (Ver figura 5)

Atraso de tiempo = $1/4$ de periodo = 90 grados de :

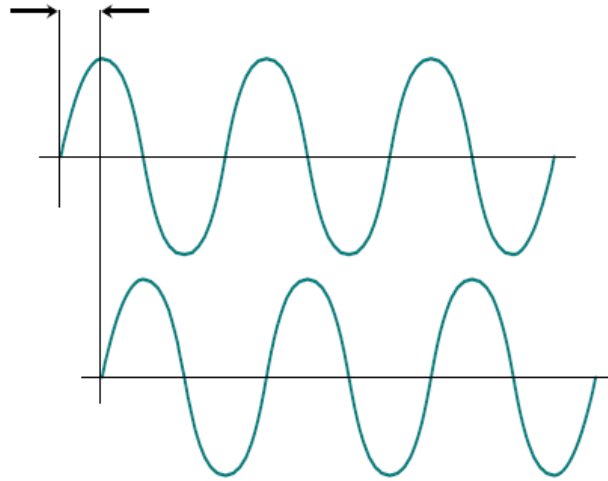


Figura 5. Concepto de fase

Fuente: Glen White (1990-2010)

Unidades de la amplitud

En el sistema inglés de medición, el desplazamiento se mide generalmente en mils (milésimos de pulgada), y el valor pico a pico se usa por convención. La velocidad generalmente se mide en pulgadas por segundo y la convención es de usar el valor pico o el valor RPC. Lo más común es de usar el valor pico, no porque sea mejor, pero debida a una larga tradición. La aceleración se mide generalmente en Gs. 1G es la aceleración debida a la gravedad en la superficie de la tierra. El G en realidad no es una unidad de aceleración--es sencillamente una cantidad de aceleración a que estamos sometidos como habitantes de la tierra. (Ver figura 6)

A veces la aceleración se mide en pulgadas por segundo por segundo (pulgadas/seg²) o m/seg², que son unidades verdaderas. Un G es igual a 386 pulgadas / seg² o 9. 81 m/seg².

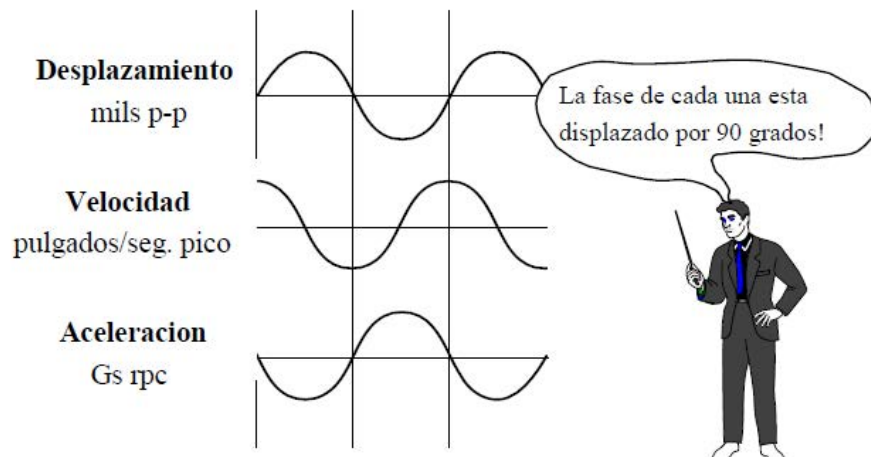


Figura 6. Unidades de amplitud

Fuente: Glen White (1990-2010)

Estas razones presentadas anteriormente demuestran porque un análisis de vibración puede determinar las fuerzas de excitación actuando en una máquina. Esas fuerzas dependen del estado de la máquina, y el conocimiento de sus características e interacciones permite de diagnosticar un problema de la máquina.

Vibraciones severas

La vibración severa es la medida de precipitación de vibración como medio para localizar la inestabilidad de las maquinas rotativas, siendo los recomendables acopiados de la norma ISO 10816-1, que se representan los niveles de vibración según el tipo de maquina: Grupo K: motores eléctricos hasta 15kW; Grupo M: motores eléctricos de 15 a 75kW; Grupo T: turbomáquinas, ejecutando la medida en el nivel de velocidad y en cualidad RMS (Solar, 2014).

Vibraciones en motores alternativos

La vibración de los motores alternativos es más grande que la de los rotativos y se caracterizan por instalar de elementos en tendencias y se clasifican según el tipo de motor alternativo como maquinas nuevas, máquinas de funcionamiento

continuo, no aconsejable su uso para funcionamiento continuo, alta vibración, las fallas en la maquina no son excluibles (Solar, 2014).

Aspectos en la medición de vibración

Se busca poner el transductor de prueba lo más cerca posibles del cojinete, con metal solido entre el cojinete y el sensor, evitando el empleo en las gorras de cojinetes, ya que son de metal estrecho y conducen muy poco la energía de vibración, impidiendo también cárteres de ventiladores y extremidades de motores y elegir los lugares donde no haya juntas entre metal y metal, entre el cojinete y el sensor (White, 2015).

Medición de vibraciones

La medición de vibraciones se las realiza por medio de enses analizadores de vibración, la cual se colocan solamente en puntos susceptibles a fallas, siendo los ejes los que se dañan con mayor frecuencia, para una mayor calidad de las medidas es que hagan un buen contacto con la estructura de la máquina y se pueda tomar lectura en tres trayectorias: vertical, horizontal y axial (Olarte, 2010) (ver figuras de la 7 a la 9).

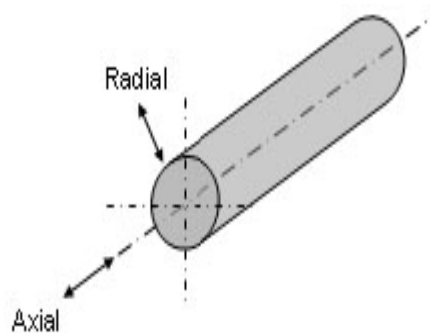


Figura 7. Planos de estudio

Fuente: Vargas Henríquez, (2018)

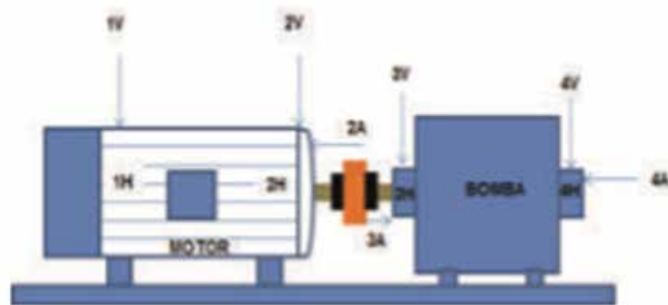


Figura 8. Puntos de apoyo vista lateral

Fuente: Vargas Henríquez, 2018)

Figura 9. Puntos de apoyo vista de planta

Fuente: Vargas Henríquez, (2018).

Con los espectros de desplazamiento, velocidad y aceleración correspondientes ilustrados en la tabla C ubicado en el anexo A.

Tipos de fallas identificadas por el análisis de vibraciones.

Hay varias fallas características en la rotación de las máquinas que se pueden identificar mediante la medición y el análisis de la vibración generado por la máquina:

Máquina desequilibrada.

La máquina está desalineada.

Resonancia.

Ejes doblados.

Alteraciones del engranaje.

Mal estado de los cojinetes y rodamientos.

Perturbaciones en el paso de la hoja.

Perturbaciones en el paso de las paletas.

Sujeción adecuada del equipo.

Fallas electromagnéticas Recirculación y Cavitación.

Fallos en el motor (rotor y estator).

Fallos en los rodamientos.

Soltura mecánica.

Velocidades críticas de la máquina.

Estado de los lubricantes.

2.2.5 Clasificación por grupos ISO 10816-1

Clase I: Partes individuales de motores y máquinas, íntegramente conectadas a la máquina completa en sus condiciones normales de operación. (Motores eléctricos de hasta 15 KW son ejemplos típicos de este grupo).

Clase II: Máquinas de tamaño medio (típicamente motores eléctricos entre 15 y 75 KW de salida), sin cimientos especiales, o máquinas rígidas (por encima de 300 kW) sobre apoyos especiales.

Clase III: Grandes máquinas motrices y otras más grandes máquinas con masas rotativas montada sobre apoyos rígidos y pesados que son relativamente rígidos en la dirección de las medidas de vibración.

Clase IV: Grandes máquinas motrices y otras grandes máquinas con masas rotativas montadas sobre apoyos relativamente blandos en la dirección de las medidas de vibración (por ejemplo, turbogeneradores, especialmente aquellos son subestructuras ligeras). (Ver figura 10)

Velocity Severity		Velocity Range Limits and Machine Classes			
mm/s RMS	in/s Peak	Small Machines Class I	Medium Machines Class II	Large Machines	
				Rigid Supports Class III	Less Rigid Supports Class IV
0.28	0.02	Good	Good	Good	Good
0.45	0.03				
0.71	0.04				
1.12	0.06	Satisfactory	Satisfactory	Good	Good
1.80	0.10				
2.80	0.16	Unsatisfactory (alert)	Unsatisfactory (alert)	Satisfactory	Satisfactory
4.50	0.25				
7.10	0.40	Unacceptable (danger)	Unacceptable (danger)	Unsatisfactory (alert)	Unsatisfactory (alert)
11.20	0.62				
18.00	1.00				
28.00	1.56	Unacceptable (danger)	Unacceptable (danger)	Unacceptable (danger)	Unacceptable (danger)
45.00	2.51				

Figura 10. Criterios de evaluación según estándar ISO 10816-1

Fuente: ISO 10816-1

Las últimas actualizaciones de la Norma sugieren que se debe tener en cuenta el tipo de montaje donde está ubicado el equipo, por lo que es necesario complementar el estándar ISO 10816-1 en cuanto a las zonas de evaluación de condición de maquinaria industrial con lo cual la clasificación para maquinaria industrial hace uso del estándar ISO 10816-3.

Las significativas diferencias en el diseño, tipos de apoyos y estructuras, requieren una división en grupos. La maquinaria de estos grupos puede tener eje horizontal, vertical o inclinado y además pueden estar montados en soportes rígidos o flexibles.

2.2.6 Clasificación por Grupos ISO 10816-3

: Máquinas rotatorias grandes con potencia nominal sobre 300 KW. Su rango de operación es de 120-15000 RPM.

: Máquinas rotatorias medianas con potencia nominal entre 15 hasta 300 KW.

: Máquinas rotatorias pequeñas con motores externos, con potencias sobre 15 KW.

: Máquinas rotatorias pequeñas con motor integrado, con una potencia nominal de 15 KW.

2.2.7 Clasificación de condiciones de maquinaria.

: (Buena) Es la zona de evaluación de la mayoría de máquinas nuevas

: (Satisfactoria) Máquinas con vibración en esta zona se consideran aceptables.

: (Insatisfactoria) Máquinas que presentan algunos fallos, pero no es obligatorio detenerlas.

: (Inaceptable) Son valores de vibración donde el equipo presenta daños internos y su mantenimiento se debe programar con alta prioridad. (ver figura 11)

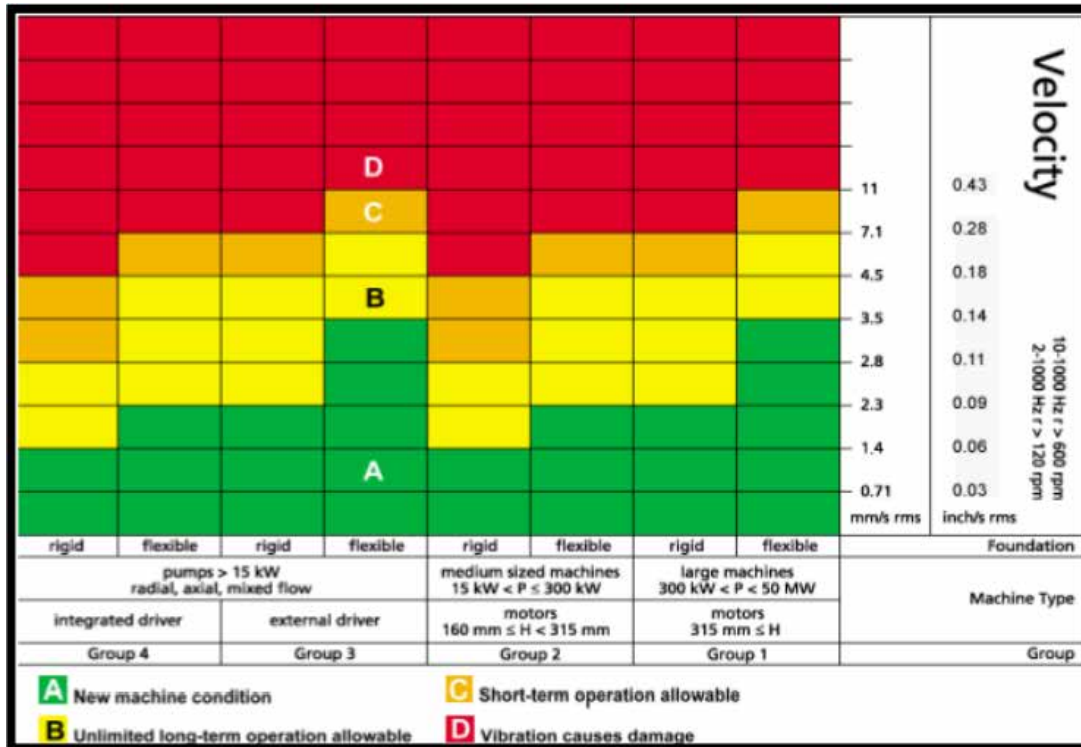


Figura 11. Criterios de evaluación según estándar ISO 10816-3.

Fuente: ISO 10816-3

El alcance atribuido al mantenimiento predictivo por vibraciones mecánicas está supeditado a la mayor rentabilidad, seguridad y precisión en el diagnóstico.

2.2.8 Criterios de severidad para aceleración envolvente.

La Aceleración envolvente (gE) no está categorizada por ISO 10816-1, sin embargo, esta es una valiosa herramienta de evaluación para el rodaje y estado del cojinete del elemento, y se puede utilizar junto con las pautas generales anteriores. Tenga en cuenta que las máquinas se clasifican según el tamaño del eje (en mm) y la velocidad de rotación, que son una función del diseño del rodamiento.

Enveloping Severity gE peak to peak	Shaft Diameter & Speed		
	Dia. between 200 & 500mm and Speed <500rpm	Dia. Between 50 & 300 mm & speed between 500 & 1800rpm	Dia. Between 20 & 150mm & Speed is either 1800 or 3600rpm
0.1	Good	Good	Good
0.5	Satisfactory	Satisfactory	Good
0.75			
1	Unsatisfactory (alert)		Satisfactory
2	Unacceptable (danger)	Unsatisfactory (alert)	Unsatisfactory (alert)
4		Unacceptable (danger)	Unacceptable (danger)
10			Unacceptable (danger)

Figura 12. Criterios de severidad para aceleración envolvente.

2.2.9 Cuadros de diagnóstico de vibraciones.

Los cuadros del 1 al 13 proporcionan un resumen de la mayoría de las informaciones acerca del diagnóstico de máquinas, pero no pretenden ser exhaustivas.

Cuadro 1. Diagnóstico /Desbalanceo

Fuente de vibración	Frecuencia de excitación	Plano dominante	Amplitud	Carácter espec. del Envolente	Comentarios
Desbalanceo de la masa. Termale.	1X	Radial*	Uniforme	Banda angosta	Flexión debida tensiones estáticos puede causar un incremento de la amplitud con la temperatura

Dinámico	1X	Radial		Por lo general algunos armónicos 1X	Forma más común desbalanceo
Par de fuerzas	1X	Radial, Axial			
Rotor sobresaliente	1X	Radial, Axial			
*En el plano radial incluye la dirección tangencial en todas las tablas.					

Cuadro 2. Diagnóstico/ Desalineación

Fuente de vibración	Frecuencia de excitación	Plano dominante	Amplitud	Carácter espec. del Envoltente	Comentarios
Desalineación angular	1X, 2X	Axial	Uniforme	Banda angosta	La mayoría de las desalineaciones son una combinación de paralelo y angular.
Desalineación paralela	1X, 2X	Radial	Uniforme	Banda angosta	En largos acoplamientos, 1X será más alto.
Combinación de paralelo y angular	1X, 2X	Radial, Axial	Uniforme	Banda angosta	Desalineación también se ve múltiplos de 2X.
Rodamiento chueco	2X, 1X incrementados y tonos de rodamiento	Radial, Axial	Alta uniforme	Banda angosta	Generalmente acompañada de componentes axiales.

Impulsora desalineada	2X, incremento en armónicos de ritmo de álabes	Radial	Uniforme	Banda angosta	Generalmente acompañada de amplitudes bajas axiales.
Desalineamiento de engranes	Fuerte ritmo de engranaje	Radial, Axial	Uniforme	Generalmente bandas laterales alrededor del ritmo del engranaje	Armónicos del engranaje son comunes.

Cuadro 3. Diagnóstico/Flecha con flexión

Fuente de vibración	Frecuencia de excitación	Plano dominante	Amplitud	Carácter espec. del Envolvente	Comentarios
Flecha con exflexión ligera	1X, 2X	Radial, Axial	Uniforme	Banda angosta	Movimiento céntrico en el acoplamiento parece desbalanceo
Flecha con exflexión al acoplamiento	1X, 2X	Radial, Axial	Uniforme	Banda angosta Quizás armónicos de 2X, 3X.	Movimiento céntrico en el acoplamiento parece desalineación.

Cuadro 4. Diagnóstico/Problemas de rodamientos con Gorrónes

Fuente de vibración	Frecuencia de excitación	Plano dominante	Amplitud	Carácter espec. del Envolvente	Comentarios
Remolino de aceite	0.38X hasta 0.48X	Radial		Pico agudo	Movimiento céntrico en el acoplamiento parece desalineación.
Latigazo de aceite	0.38X hasta 0.48X	Radial		Pico agudo	Movimiento excéntrico en la base del rotor parece desbalanceo Movimiento excéntrico en el acoplamiento parece desalineación.
Juego excesivo en el rodamiento	Armónicos de 1X	Radial		Protuberancia en la serie de los armónicos	4X hasta 8X y/o 7X hasta 15X
Holgura en el rodamiento con Gorrónes. Rechina.	0.5X, 1X	Radial		Armónicos 0.5X	
Rodamientos de Gorrónes de Empuje. Rodamientos Zapatillas. Kingsbury.	1X, Ritmo de la zapatilla Kingsbury	Axial		Armónicos 1X, Armónicos del ritmo de zapatilla Kingsbury	Generalmente seis

Cuadro 5. Diagnóstico/Problemas de rodamientos con elementos rodantes

Fuente de vibración	Frecuencia de excitación	Plano dominante	Amplitud	Carácter espec. del Envolvente	Comentarios
Anillo interior defectuoso. Defecto pequeño	bpfi, armónicos de bpfi	Radial	Uniforme	Picos síncronos	Carga Radial
Defecto interior defectuoso. Un defecto moderado	bpfi con armónicos y bandas laterales de 1X	Radial	Modulado en Amplitud	Picos no síncronos con bandas laterales de 1X.	Niveles de carga radial incrementados
Anillo interior defectuoso. Dos o tres defectos pequeños.	bpfi y armónicos.	Radial	Alta, Uniforme	Banda Ancha	El ruido de banda ancha incrementa
Anillo interior defectuoso. Múltiples pequeños defectos Asperosidad alrededor del anillo.	bpfi y armónicos prominentes	Radial	Alto, Uniforme	Picos no Síncronos	El ruido de banda ancha incrementa
Anillo exterior defectuoso. Un pequeño defecto	bpfi y armónicos.	Radial	Uniforme	Picos no Síncronos	Los armónicos tienen un más alto que la frecuencia fundamental.
Anillo exterior defectuoso. Un solo defecto moderado.	bpfi y armónicos.	Radial	Uniforme	Picos no Síncronos	El ruido de banda ancha incrementa
Bola o rodillo defectuoso. (Único).	bpfi y armónicos.	Radial	Alta. Uniforme	Banda angosta	El ruido de banda ancha incrementa
Bolas defectuosas (varias)	bpfi y armónicos.	Radial	Uniforme	Banda angosta	El ruido de banda ancha incrementa

(continuación)

Fuente de vibración	Frecuencia de excitación	Plano dominante	Amplitud	Carácter espec. del Envolvente	Comentarios
Jaula defectuosa. Rota en un lugar.	Ruido de banda ancha.	Radial	Uniforme	Banda ancha	Nivel de ruido bajo
Jaula rota en pedazos.	Ruido de banda ancha.	Radial	Uniforme	Banda ancha	Ruido causado por los pedazos de la jaula en el rodamiento
Precarga o lubricación inadecuada	Ruido de alto frecuencia "montón de heno"	Radial		Banda ancha	El ruido de banda ancha incrementa
Holgura del rodamiento girando en la flecha	Armónicos 1X	Radial		Banda Angosta	Número y amplitud de los armónicos función de la holgura.
Holgura en el carter	1X, 2X, 3X	Radial		Banda Angosta	
Holgura extrema o falla	0.5X y Armónicos	Radial		Banda Angosta	Línea de base del ruido de baja frecuencia se va elevando.
Juego excesivo en un rodamiento	Armónicos 0.5X, 1X	Radial		Banda Angosta	4X hasta 8X o 7X hasta 15X
Rodamiento Chueco	1X, 2X, Tonos de rodamiento	Axial, Radial	Elevado Uniforme	Banda Angosta	Diferencia de fase de 180 grados en medidas axiales en cada lado del cárter del rodamiento.
<p>Observen:</p> <p>x:frecuencia del rotación</p> <p>ftf:frecuencia fundamental de tren (aprox 0.38 hasta 0.42)</p> <p>bsf:frecuencia de rotación de bola (aprox 1.5X hasta 3X)</p> <p>bpfi:frecuencia de paso de bola, anillo interior (aprox. 4X hasta 10X)</p> <p>bpfo:frecuencia de paso de bola, anillo exterior (aprox. 2X hasta 7X)</p>					

Cuadro 6. Diagnóstico/Holgura Mecánica

Fuente de vibración	Frecuencia de excitación	Plano dominante	Amplitud	Carácter espec. del Envolvente	Comentarios
Holgura de las bases	Armónicos 1X	Generalmente tangencial	Uniforme	Banda Angosta	Indicado por flexibilidad de la base
Holgura en Rodamiento Gorrón	Armónicos 1X	Radial	Uniforme	Banda Angosta	Los armónicos se pueden extender hasta 10X.
Holgura extrema de rodamiento con gorrón	Armónicos 0.5X	Radial	Uniforme		A veces también hay armónicos 0.25X.

Cuadro 7. Diagnóstico/Problemas de Motor Eléctrico

Fuente de vibración	Frecuencia de excitación	Plano dominante	Amplitud	Carácter espec. del Envolvente	Comentarios
Contacto incorrecto cepillos conmutador (Motores CD)	— Hz	Radial		Banda Angosta	n = cualquier entero positivo c = número de segmentos del conmutador X = velocidad de la máquina (RPM)
Barras de rotor rotas	2X deslizamiento X número de polos	Radial	A veces batido	Banda angosta	A veces causa bandas laterales de deslizamiento en 2X alrededor de 120 Hz.
Paso de ranuras de motor a inducción	— ±120	Radial			S = frecuencia de paso de ranuras del rotor en Hz B = número de barras del rotor X = velocidad del rotor (RPM) 120 = doble de la frecuencia de línea en Hz.

Cuadro 8. Diagnóstico/Problemas de Bomba

Fuente de vibración	Frecuencia de excitación	Plano dominante	Amplitud	Carácter espec. del Envoltente	Comentarios
Holgura no rotativa	1X, 2X, 3X	Radial	Uniforme	Banda Angosta	Armónicos hasta 10 X
Holgura rotativa (rotores, impulsores, etc.)	Paso de alabes, = V	Radial	Radial Varía de arranque a arranque	Banda Angosta	A veces también armónicos 0.5X
Bombas centrífugas con V alabes	Paso de alabes	Radial	Ritmo de alabes fluctuando	Armónicos de la bomba	En bombas largas la amplitud más fuerte ocurre al ritmo de los alabes. En bombas más pequeñas, la amplitud más fuerte ocurre a los armónicos del ritmo de los alabes.
Bombas con engranes de T dientes	Engranaje = Tx	Radial			Más que una voluta de descarga (como en bombas con rotores múltiples) creará armónicos de la frecuencia de engranaje
Rotor Rozando	0.5X, 1X	Radial	Uniforme	Banda Angosta	Puede excitar el rotor críticamente
Bombas a Husillo	SX	Radial			Número de hilos en la rosca
Cavitación o hambruna	Aleatorio	Radial	Fluctúa	Banda Ancha	A veces ruido aleatoria, hasta 20 kHz
<p>Observen V = número de alabes de la bomba T = número de dientes del engrane S = número de hilos en las rosca</p>					

Cuadro 9. Diagnóstico/Problemas de Turbinas

Fuente de vibración	Frecuencia de excitación	Plano dominante	Amplitud	Carácter espec. del Envoltente	Comentarios
Problema de juego de rotor	Ritmo de paso de alabes rotor	Radial	Uniforme	Banda Angosta	
		Radial	Uniforme	Banda Angosta	Los Armónicos por lo general son más altos en nivel que 1X. Bandas laterales alrededor del paso de alabes en 1X

Cuadro 10. Diagnóstico/Problemas de Ventiladores

Fuente de vibración	Frecuencia de excitación	Plano dominante	Amplitud	Carácter espec. del Envoltente	Comentarios
Problema de juego de aspa y del carter del ventilador	Ritmo de aspas =X veces el número aspas	Radial	Uniforme	Banda Angosta	A veces hay armónicos al paso de aspas.
Desbalanceo del ventilador	1X	Radial	Uniforme	Banda Angosta	
Problema de paso	1X	Axial	Uniforme	Banda Angosta	
Velocidad de aire desigual	Paso de Aspas	Radial	Uniforme	Banda Angosta	

Cuadro 11. Diagnóstico/Problemas de Compresor.

Fuente de vibración	Frecuencia de excitación	Plano dominante	Amplitud	Carácter espec. del Envolvente	Comentarios
Tipo Difusor	Paso de alabes	Radial	Uniforme	Banda Angosta	
Tipo Pistón	2X	Radial, Axial	Uniforme	Banda Angosta	Por lo general armónicos 1X

Cuadro 12. Diagnóstico/Problemas de Bandas.

Fuente de vibración	Frecuencia de excitación	Plano dominante	Amplitud	Carácter espec. del Envolvente	Comentarios
Bandas mal emparejadas, desgastadas o estiradas	Múltiplos de la frecuencia de banda (B). Por lo general, 2B es lo más fuerte.	Radial en línea	Puede hacer un batido con fluctuaciones si 2B está cerca de cualquiera de las flechas		B siempre es inferior a 1X
Poleas excéntricas o desbalanceados	Flecha x1	Radial	Uniforme		Se confunde fácil con desbalanceo
Desalineación de la banda o de la cara de polea	1X de la polea activadora	Axial	Uniforme		Confirmar con un estroboscopio
Resonancia de la banda	Varía	Radial	Puede fluctuar		Resonancia de la banda sin relación con la velocidad de rotación
Tensión de la banda incorrecta					Puede producir resonancia en la banda. (Ver arriba) Puede incrementar el desgaste de los rodamientos

Cuadro 13. Diagnóstico/Problemas de engranes.

Fuente de vibración	Frecuencia de excitación	Plano dominante	Amplitud	Carácter espec. del Envolvente	Comentarios
Contacto de dientes incorrecto (Engranaje)	X veces número de dientes en el engrane	Radial, Axial	Uniforme, a veces con batidos	Banda Angosta	Muchas veces con 1X de las bandas laterales de cualquier de los dos engranes
Excentricidad del engrane	1X engranaje	Radial		Banda Angosta	El engrane puede ser balanceado pero montado en un rotor desbalanceado. Bandas laterales 1X están presentes alrededor del engranaje
Desalineación de engranes	2X engranaje	Axial	Uniforme	Banda Angosta	Bandas laterales 1X alrededor del engranaje
Línea de paso Movimiento excéntrico. Desbalanceo de masa o dientes defectuosos.	1X más la frecuencia del engranaje	Radial para engranes rectos, más axial para engranes helicoidales simples o dobles.	Uniforme	Banda Angosta	Bandas laterales 1X alrededor del engranaje
Errores de fabricación	Engranaje, Frecuencia fantasma por lo general no síncrono con 1X	Radial	Uniforme	Banda Angosta	Errores de fabricación debido a problemas en los engranes de activación de la fresadora y las cortadoras pueden causar componentes fantasmas
Problemas de engranes planetarios	Dependen en gran parte de la geometría de la caja	Radial	Uniforme	Banda Angosta	Es común encontrar bandas laterales alrededor del engranaje al ritmo de la órbita del engrane planeta...

2.2.10 Propiedades Estadísticas de Señales de Vibración.

La firma de vibración, o la gráfica que representa su comportamiento cuando es analizada, de una máquina siempre tiene una variación aleatoria. Esto quiere decir que no se puede predecir su valor al instante. Aun así, la probabilidad de que un valor dado caiga dentro de un cierto rango de amplitudes es predecible en un sentido estadístico. Por ejemplo, consideramos una señal corta de la señal de velocidad de la vibración de una máquina en operación. La velocidad de vibración V puede variar en cualquier momento en una manera aleatoria, alrededor de un valor mediano. Supongamos que la escala está dividida en una serie de pequeñas divisiones. Entonces la probabilidad estadística que una señal se encontrará en una división se puede medir, anotando el tiempo que la señal permanece en cada división, dividido entre el tiempo de monitoreo total de la señal. La probabilidad de densidad es una medida de la distancia desde el valor mediano, y la amplitud se anotará contra la amplitud. La curva de probabilidad de densidad con la que más estamos familiarizados es la famosa curva de distribución normal o de Gauss, que se conoce popularmente como la curva en forma de campana. (Ver figura 13)

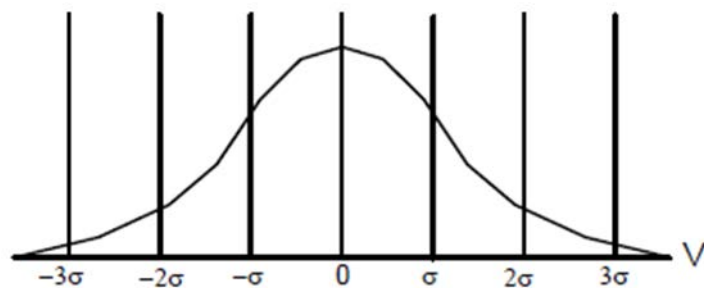


Figura 13. Distribución de la probabilidad de Gauss.

Fuente: Cristóbal Salcedo & José Rondón.

El valor RPC de una señal con una distribución de Gauss se llama la desviación producirá una distribución de Gauss, y la experiencia ha demostrado que las máquinas sanas también producen distribuciones de Gauss. A medida que se van a desarrollar fallas en las máquinas, las curvas de distribución cambian de forma.

2.2.11 Clasificación para la evaluación vibratoria según la Norma ISO 10816.

Una guía de referencia para distinguir entre lo que puede entenderse como un funcionamiento normal o admisible de la máquina y un nivel de alerta lo constituyen normas internacionales como la ISO 10816. Esta norma establece las condiciones y procedimientos generales para la medición y evaluación de la vibración, utilizando mediciones sobre partes no rotativas de la máquina. El criterio general de evolución se basa tanto la monitorización operacional como en pruebas de validación que han sido establecidas fundamentalmente con objeto de garantizar un funcionamiento fiable de la máquina a largo plazo. Esta norma reemplaza a las ISO 2372, que han sido objeto de revisión técnica.

La ISO 10816, consta de cinco partes fundamentales para los criterios de evaluación del estado de la máquina, los cuales son:

- : Indicaciones generales.
- : Turbinas de vapor y generadores que superen los 50 MW con velocidades típicas de trabajo de 1500, 1800, 3000 y 3600 RPM.
- : Maquinaria industrial con potencia nominal por encima de 15 kW y velocidades entre 120 y 15000 RPM.
- : Conjuntos movidos por turbinas de gas excluyendo las empleadas en aeronáutica.
- : Conjuntos de máquinas en plantas de hidrogenación y bombeo (únicamente disponible en inglés).

Para este caso se hace uso de la parte 1 y la parte 3 de la Norma ISO 10816, ya que para el estudio la mayoría de equipos es maquinaria industrial entre 0 y 50 MW. Las

máquinas se diferencian por su tamaño, por su rigidez, así como su amortiguamiento, lo que incide en que los valores de los niveles de vibración no sean iguales, inclusive, entre máquinas idénticas operando bajo las mismas condiciones.

2.2.12 Aceleración Envolvente

Cuando un defecto de cojinete es pequeño, los impactos de los elementos rodantes en defecto causan que los componentes del cojinete resuenen como una campana. Este sonido ocurre en una frecuencia mucho más alta que las frecuencias fundamentales de cojinete de Jaula, de la Carrera Interior, de la Carrera Exterior, y de los balines. Visualice un defecto exterior de la carrera, en que cada vez un elemento rodante golpea los componentes del cojinete, y entonces bajan hasta que el próximo elemento golpee el defecto. La frecuencia que fuerza es la frecuencia del paso del balín de la carrera exterior. La respuesta consiste en las frecuencias resonantes de los componentes del cojinete y de la caja del cojinete. Las frecuencias resonantes de los componentes del cojinete varían basadas en el material, en la estructura, en la masa, en la carga, y en la frecuencia de excitación.

2.2.13 Ventajas del análisis por vibraciones.

Entre las primordiales ventajas se puede identificar algún defecto en la maquinaria sin la necesidad de desbaratar el equipo, al presentar una avería se puede pedir con anticipación los repuestos que se requieran, e ir solicitando el personal idóneo para la reparación. El personal que opera la máquina obtendría las mejores condiciones ambientales para laborar con un nivel bueno de vibración (Víctor Manuel, 2017).

2.2.14 Desventajas del análisis por vibración.

Que la definición del rango de los límites adecuados, debido a que si manejamos límites bajos se tiende a generar alarmas falsas y con límites muy elevados mucha avería pasaría sin ser notorias, es esa la necesidad del personal especializado para procesar la toma de decisiones y mediciones. Los costos iniciales por la adquisición de los elementos son altos (Víctor Manuel, 2017).

2.2.14 El mantenimiento.

La normativa francesa AFNOR X 60-010 define el mantenimiento como un conjunto de actividades destinadas a establecer o mantener un bien en un estado o en unas condiciones funcionamiento con toda seguridad, para cumplir con esta función a realizarse. Aquellas actividades suponen una mezcla de prácticas administrativas, técnicas y de gestión. Es decir, todo sistema que este funcional en cualquier proceso productivo tiende a dañarse de una forma progresiva y puntual, el mantenimiento se encarga de restablecer la manera inicial del mismo, es decir, que una máquina o instalación cumpla las funciones correctamente para las cuales fueron creadas, de la manera más económica y eficiente (Estévez, 2015).

El mantenimiento predictivo es más utilizado todos los días en todo tipo de industria debido a su uso ventajoso para obtener mayor confiabilidad, menores costos por mantenimientos, comúnmente se clasifican en tres categorías: Mantenimiento preventivo basado en tiempo, Mantenimiento predictivo o basado en la condición de la máquina (Saavedra, 2018). Esta técnica busca detectar señales de advertencia que muestren que parte no está trabajando de manera habitual, haciéndolo de una manera no minuciosa para la máquina y que la producción no sea perjudicada mediante una serie de muestrarios no dañinos. La meta es advertir de manera rápida, prediciendo los daños antes de que aparezcan (Sánchez, 2017).

El continuo y eficiente trabajo es una necesidad de las industrias, y el mantenimiento en las empresas de gran importancia para la conservación de las instalaciones y máquinas, siendo el mantenimiento predictivo el encargado de detectar fallas en los equipos antes de que estos dejen de funcionar y detengan el proceso productivo, mediante el seguimiento de variables relacionadas para predecir daños y realizar acciones correctivas en el momento adecuado (Olarde & Botero, 2015).

2.2.15 Historia del mantenimiento

Desde los comienzos de las personas los siglos XVII y XVIII la prevención y mantenimiento que se le hacían en las maquinarias no obtuvo un gran avance debido a la menor importancia que tenían esto con respecto a la mano de obra, por ende, el mantenimiento que se daba en ese tiempo era de mantenimiento correctiva. Sólo se reparaba la máquina cuando tenía paros o fallas y no se pensaba en el servicio que ésta daba (López E. 2016). A lo largo del avance industrial la función de los mantenimientos ha pasado por algunas etapas. En los principios de la revolución industrial eran los mismos operadores quienes se encargaban de los arreglos de los equipos. Conforme las máquinas se iban haciendo más avanzadas y los trabajos de reparación subían, comenzaron a crearse las primeras áreas de mantenimiento. En esta época (mitad del siglo 19), las tareas de mantenimiento eran solamente correctivas, y se dedicaba todo el empeño en reparar las fallas que se producían en los elementos. (López E., 2016).

2.2.16 Evolución del mantenimiento

Conforme paso el tiempo y a través de los muchos esfuerzos para mejorar su trabajo haciendo de las maquinarias más rápidas y de precisión, en la actualidad se logra obtener un producto o buen servicio con máquinas que se encargan de crear más de 90% de esto, lo cual ha sido posible por el esfuerzo que la humanidad le ha puesto al avance de la labor de cuidado a sus recursos físicos, materia a la que desde sus principios se lo llamó mantenimiento (ver figura 14).

EPOCA	TIPO DE MANTENIMIENTO APLICADO	PAISES DE APLICACIÓN
ANTES - SIGLO XIX	Mantenimiento de conservación correctiva: solo se arreglaban las máquinas cuando presentaban paros o fallas	PAISES INDUSTRIALIZADOS DE LA EPOCA
1916 - 1950	Mantenimiento preventivo, detección y tratamiento de anomalías antes de que causen defectos o pérdidas.	ESTADOS UNIDOS DE AMERICA
AÑOS 50'S y 60's	Se complementa al mantenimiento preventivo con el mantenimiento productivo, se le da más importancia a la fiabilidad para la entrega de servicio al cliente.	JAPON
AÑOS 70'S y 80's	Mantenimiento Productivo Total TPM, basado en el respeto y participación de todo el personal de las compañías.	JAPON Y ALGUNOS PAISES OCCIDENTALES
AÑOS 90'S Y PRINCIPIO DE SIGLO XXI	Se presenta un mantenimiento más participativo y enfocado a la eliminación de desperdicios y pérdida en cualquier área de las compañías a partir de la aplicación del TPM.	GLOBALIZACIÓN, EN TODO EL MUNDO

Figura 14. Tipo de mantenimiento según la época

Fuente: (López E., 2016)

2.2.17 Tipos de mantenimientos.

Mantenimiento correctivo.

El mantenimiento correctivo es el más común en la mediana y pequeña empresa y aunque es el que tradicionalmente se ha ido empleando, lidera desde hace algunos tiempos las introducciones de programas de mantenimiento preventivo cuyos resultados a mayor plazo son mucho más falibles. El mantenimiento correctivo está basado en la intervención en el caso de averías, manifestadas como el colapso de una instalación o un elemento, es decir la interrupción total de la producción, no siempre las averías toman el mismo tiempo en arreglarse y esto causa retrasos del programa y colapso de fuentes de trabajo. Existen averías un poco inusuales que paralizan el

elemento por largos tiempos, lo cual obliga a cambiar el elemento o tomar uno en Alquiler, esto eleva los costos de la industria significativamente (Villegas, 2016).

Ventajas

No requiere planeación.

No requiere recopilación de datos.

No requiere costos por mantenimiento programado.

Desventajas

Mayor requerimiento de personal

Los paros continuos impiden el cumplimiento de la producción.

Los costos de reparación son mayores.

El equipo puede sufrir daños irreparables en tiempos útiles y beneficios.

La calidad de reparación es baja.

Elevado inventario de repuestos Disposición de repuestos apropiados.

El tiempo de reparación no es el más óptimo.

Mantenimiento preventivo.

El fin del mantenimiento preventivo es: eliminar la mayoría de los accidentes por la falta o carencia de dicho mantenimiento en las instalaciones y equipos. Además, el mantenimiento productivo prolonga el buen funcionamiento la vida útil de todos los equipos. Debemos tener claro que es una inversión necesaria; que los elementos con el tiempo se deterioran y para hacerlo más rentable por su costo y prolongar su vida útil, es necesario darle un respectivo y adecuado mantenimiento (Hidalgo, 2014).

Ventajas

El riesgo de alguna falla o fuga, según sea el caso, es disminuido considerablemente.

El costo de este mantenimiento es menor en comparación con el correctivo.

La aparición de paros imprevistos es reducida.

Facilita el poder llevar una mejor planeación y un mejor control sobre el mantenimiento que debe ser aplicado tanto en los dispositivos como en las instalaciones.

Desventajas

Dificulta determinar de manera precisa el nivel de depreciación o desgaste de las piezas que conforman los distintos equipos

Es necesario tanto que el personal encargado del mantenimiento cuente con experiencia en los dispositivos, así como atender las recomendaciones hechas por el fabricante.

Mantenimiento predictivo.

Este tipo de mantenimiento se trata sobre condición, que es de manera preventiva realizado acorde a los resultados de la monitorización del equipo. Cuando este tipo de mantenimiento se realiza siguiendo una predicción, a consecuencia del análisis y las evaluaciones de los parámetros significativos de la degradación del equipo, se llama mantenimiento predictivo. Son muchas las ventajas que traen consigo este tipo de mantenimiento, como, conocimiento del estado de la máquina en todo momento, se reducirán prácticamente los daños imprevistos, se minimiza el tiempo de reparación pues se conoce cuál es la causa del daño que ha provocado la parada del elemento, se identifican daños ocultos, se reducen las piezas de refacción, entre otros (Estévez, 2015).

Ventajas

Elimina pérdidas de producción.

Incluye las ventajas del mantenimiento preventivo, por ser una etapa avanzada del mismo.

Elimina la necesidad de una inspección periódica programada.

Reduce tiempos de mantenimiento.

Encuentra serios problemas.

Desventajas.

Requiere equipos de monitoreo.

Personal entrenado en monitoreo.

Actualización tecnológica constante.

Como ya se mencionó, cada método de mantenimiento tiene su propio proceso, pero en la actualidad la mayoría de las empresas está exigiendo un departamento de mantenimiento predictivo basado en la confiabilidad debido a que cada uno tiene su límite donde deja de ser predictivo a preventivo y de preventivo a correctivo. Todas las técnicas de mantenimiento ya mencionadas ayudan al trabajo eficaz, seguro, eficiente y óptimo para las empresas nacionales e internacionales de cualquier parte del mundo, entre las cuales, vamos a explicar con más detalle por qué el uso primordial del mantenimiento predictivo basado en la confiabilidad. Antes de entrar en el mantenimiento predictivo basado en la confiabilidad primero hay que saber que es la confiabilidad.

Confiabilidad

La confiabilidad es la capacidad de un equipo, objeto o máquina de desempeñar una función requerida, en condiciones establecidas durante un período de tiempo determinado. Es decir, que habremos logrado la confiabilidad requerida cuando el equipo hace lo que queremos que haga y en el momento que queremos que lo haga, ya conociendo sobre que es la confiabilidad, se puede conocer la técnica de mantenimiento predictivo basado en la confiabilidad.

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

Ecuación básica.

La ecuación para el cálculo se basa en la expresión desarrollada por el ingeniero Lourival Tavares, en la cual la confiabilidad está en función del MTBF y el MTTR:

(1)

Dónde: R: Confiabilidad.

MTBF: Tiempo Medio Entre Fallas.

MTTR: Tiempo Medio Para Reparación.

Ahora veamos cómo se relacionan las tres variables de la ecuación:

_____ (2)

Como se observa en la ecuación, dicha expresión no es más que la definición de probabilidad según Laplace: Número de aciertos (MTBF= tiempo total que funciona el activo sin fallar) sobre el número total de eventos (tiempo total que funciona el activo más el tiempo que estuvo parado para reparaciones). Esta es la ecuación básica para el cálculo de la confiabilidad. Ahora bien, ¿cómo se determinan el MTBF y el MTTR?

Las ecuaciones son las siguientes:

— (3)

— (4)

Donde.

: Horas trabajadas o de marcha durante el período de evaluación.

p: Número de paros durante el período de evaluación.

: Horas de paro durante el período de evaluación.

Es aquí donde se hace importante tener, de manera clara, la clasificación de los paros por mantenimiento o producción, pues si se quiere calcular la confiabilidad por mantenimiento, por ejemplo, las horas de paro y el número de paros deben ser los imputados a mantenimiento exclusivamente. Por ello el mantenimiento predictivo y la confiabilidad van de la mano ya que cada uno ayuda al operador a elaborar un diagnóstico detallado del equipo el cual se esté trabajando.

Mantenimiento basado en confiabilidad

El mantenimiento predictivo basado en confiabilidad MPBC es una metodología ampliamente reconocida y de uso extendido para elaborar planes de mantenimiento de equipos industriales basándose en asegurar las funciones del equipo para la satisfacción del usuario o propietario. Actualmente existen varias metodologías de MPBC, sin embargo, la esencia de esta metodología está contenida en la norma SAE JA1011. El MPBC es una técnica de organización de las actividades y de la gestión del mantenimiento para desarrollar programas organizados que se basan en la confiabilidad de los equipos. El MPBC asegura un programa efectivo de mantenimiento que se centra en que la confiabilidad original inherente al equipo se mantenga.

John Moubrey definió el MPBC como un proceso utilizado para determinar que se debe hacer para asegurar que cualquier activo continúe haciendo lo que sus usuarios quieren que haga en su contexto operacional. Este método de mantenimiento por ser el más eficaz en tema de reducir costos y evitar paradas no programadas, se ha desarrollado diferentes técnicas de mantenimiento predictivo basado en la confiabilidad los cuales son: análisis de vibraciones, ultrasonido, ensayos no destructivos, balanceo dinámico, balanceo estático, alineación laser de ejes, alineación laser de poleas y cámara termográfica.

Entre las técnicas antes mencionadas nos vamos a enfocar en el área de ensayos no destructivos, de los cuales también se subdividen en las siguientes: ultrasonido,

inspección visual, líquidos penetrantes, análisis de vibraciones mecánicas, análisis de aceite, entre otros. Cada tipo de ensayo no destructivo es esencial para no maltratar y desgastar el equipo en el cual se esté trabajando sin alterar el funcionamiento de la misma. Como se puede observar el mantenimiento predictivo basado en confiabilidad es un tema muy amplio, con sus técnicas y tipos de mantenimiento, por lo cual nos vamos a centrar en el área de análisis de vibraciones mecánicas, pero primero hay que saber qué ventajas nos ofrece este tipo de ensayo no destructivo.

Modos de falla para el mantenimiento predictivo basado en confiabilidad

Llamaremos modo de falla al fenómeno responsable del evento o condición de falla. Existen varias tendencias para tratar los modos de fallas, una aconseja el reducir los modos de falla a 5 tipos:

1. Falla Total.
2. Falla Parcial.
3. Falla Intermitente.
4. Falla Gradual.
5. Sobre funcionamiento.

Por otro lado, se tienen que los estudiosos de componentes particulares, en el caso de quienes producen elementos estructurales los clasifican como:

1. Inestabilidad elástica (pandeo local o generalizado).
2. Excesiva deformación elástica.
3. Excesiva deformación plástica (fluencia generalizada).
4. Inestabilidad plástica (estricción, pandeo plástico).
5. Fatiga de alto ciclo y bajo ciclo.

6. Corrosión, erosión, corrosión-fatiga, corrosión bajo tensiones, etc.
7. Creep y creep-fatiga.
8. Fractura rápida (frágil, dúctil, mixta).

Entre tanto los analistas de cables de transmisión mecánica, cuentan con los siguientes modos de falla:

1. Fractura Subida.
2. Fractura por fatiga.
3. Desgaste adhesivo.
4. Desgaste abrasivo.
5. Corrosión generalizada y por picadura.
6. Descarga eléctrica.
7. Indentación (presión sobre el cable de un cuerpo extraño).
8. Doblado.

Y así se encontrarán numerosos ejemplos de los modos de falla, pero lo más común es que se esté entre quienes los definen como los interpretan con facilidad, por ejemplo, en el caso de un compresor tenemos:

1. Aspiración deficiente.
2. Compresión deficiente.
3. Exceso de Aceite en el aire de salida.
4. Potencia baja, motor no arranca.
5. Aire demasiado caliente.
6. Sobrecalentamiento, aire de salida demasiado caliente.

7. Aceite se ensucia muy rápido.

8. No hay compresión de aire.

Ya se conoce el mantenimiento predictivo basado en la confiabilidad MPBC, la confiabilidad, las técnicas de mantenimiento predictivo tanto de ensayos no destructivos, como de ensayos destructivos, ahora vamos con el mantenimiento predictivo basado en el análisis de vibración.

Mantenimiento predictivo basado en el análisis de vibración

El mantenimiento predictivo mediante análisis de vibraciones es, hoy en día, uno de los métodos certeros en los que más se ha desarrollado dentro de las tecnologías de mantenimiento de actual generación. Su principio es relativamente sencillo: por muy buenas que sean las tuberías, máquinas, intercambiadores de calor, válvulas, entre otros, vibran en funcionamiento, y dentro de dicha vibración se guarda gran cantidad de información que puede ser útil para conocer el estado de las máquinas. El estado de una máquina se puede conocer con una rápida base de datos, un análisis de comparaciones y tendencias con espectros de vibración patrones, para así, programar la intervención de los elementos en el momento en que realmente lo necesite (González, 2015).

Mencionadas las fallas que pueden ocurrir en un análisis de vibraciones mecánicas, es de suma importancia conocer lo que puede ocurrir en el refinador primario de planta de pulpa y cómo funciona.

2.2.18 Refinador primario de pulpa de papel.

Los refinadores de discos se usan en la industria de fabricación de papel para preparar fibras de pasta de materia prima para la formación de papel en una máquina de fabricación. La materia prima de papel contiene de tres a seis por ciento de fibras en peso seco y es alimentada entre discos que giran exactamente en dirección contraria dentro del refinador. Los discos del refinador realizan una operación abrasiva en las fibras de papel a medida que pasan de forma radial entre los discos que se mueven

contrariamente y los que no se mueven. El propósito de un refinador de disco es desgastar las fibras de pasta de madera individuales.

El proceso de las fibras en un refinador de consistencia baja se puede realizar en pastas refinadas tanto químicas como mecánicamente y en particular se puede usar secuencialmente con un refinador de consistencia alta para procesar adicionalmente las fibras después que se han separado en el refinador de disco de alta consistencia.

Producción de pasta con refinador primario mecánico.

Este proceso apareció sobre el año 1950 debido a lo costoso que resultaba el utilizar la pasta obtenida en molinos de piedra para la confección de papel periódico, pues era necesario mezclarle más de un 25% de pulpa de origen químico, la cual es más cara.

Se basa en la separación de las fibras de la madera por medio de fuerzas de cizalladura en un molino de discos de fricción, denominados refinadores mecánicos. Para introducir la madera en los refinadores, es necesario primero someter a los troncos de árbol a un proceso de astillado, el cual consiste en el corte y molienda de la madera hasta reducirla a partículas de pequeño tamaño (astillas), del orden de centímetros. Una vez obtenidas las astillas, éstas se introducen en los refinadores.

Un refinador consiste básicamente en la conjunción de dos discos de metal, uno de los cuales es móvil y gira a gran velocidad (1800 rpm), y en cuyas caras comunes existen unos surcos o ranuras de profundidad variable. La separación de estos discos depende del tamaño inicial de las astillas y del tamaño final deseado de las fibras separadas. La forma y profundidad de los surcos es diferente en la parte más interior del disco que en la parte exterior, distinguiéndose tres partes diferenciadas en un disco, dependiendo de la función realizada en cada sección.

Barras rompedoras

Son los surcos de la parte interna del disco; son profundos y anchos para procesar las astillas de mayor tamaño. Su misión es romper las astillas. Las astillas originales se introducen por el centro del disco y alimentan esta sección.

Barras refinadoras

Son los surcos de la parte intermedia del disco; en esa sección las barras son angostas y poco profundas, dispuestas en paralelo entre sí, y son alimentadas por las astillas provenientes de las barras rompedoras a través de ranuras de entrada. En esta sección las astillas son reducidas hasta aproximadamente el tamaño de una cerilla.

Barras finas

Son la sección más externa del disco refinador. Los surcos en esta zona son muy estrechos y de poca profundidad, y son los encargados de producir las astillas de tamaño final deseado.

En la Figura 15 se puede apreciar la forma y disposición de los diferentes elementos que componen el disco refinador

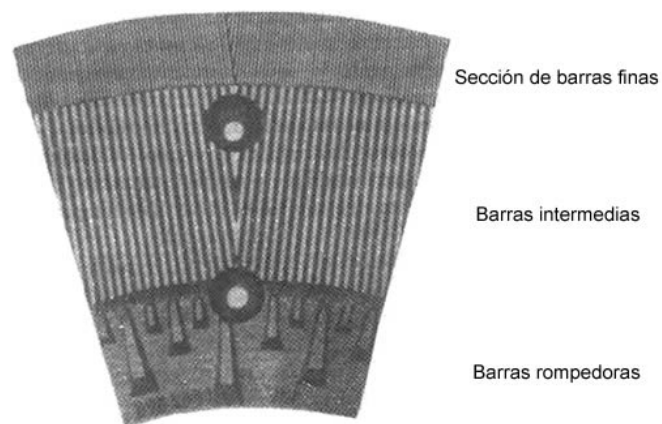


Figura 15. Disposición de los elementos en un disco refinador

Fuente: Texto Científico, 2005

La pasta obtenida por el proceso con refinador mecánico es de mayor calidad que la pasta de molino de piedra debido a la uniformidad, tamaño y forma de las fibras obtenidas. Esto se debe a que, mientras en el molido con piedra, las fibras se obtenían

de tamaño y grosor arbitrario, en el refinador se tienen astillas de dimensiones perfectamente controladas.

2.3 Bases Legales

Normativa vigente de mantenimientos por vibraciones

Las normativas internacionales (ver figura 16) sobre mantenimientos vibratorios son estándares aprobados y creados los cuales regulan las vibraciones mecánicas con la finalidad de calificar la rigidez vibratoria que está presente en un equipo. Minuciosos estudios que realizaron a través de los años sobre el tema, han permitido poner niveles de alarma y riesgos cuando se trata de una vibración que se convierte en amenaza para la maquinaria en sí y para lo que lo rodea (ISO 10816-1, 1995). En la actualidad son varias las asociaciones que han determinado varias normas que ayudan a definir la certeza de una vibración, a continuación, se muestran algunas de las primordiales (Montero & Narvárez, 2015).

Seguridad en el mantenimiento predictivo.



Figura 16. Esquema de la norma OHSAS

Fuentes: Normas OHSAS

Normativas De Seguridad

Una de las obligaciones atribuidas en Venezuela a la figura del empresario consiste en el deber de disponer de un Programa de Seguridad y Salud en el Trabajo. Su regulación viene establecida en el artículo 61 y siguientes de la Ley Orgánica de Prevención, Condiciones y Medio Ambiente de Trabajo, del 25 de julio de 2005.

Descripción del proceso de trabajo (producción o servicios).

Identificación y evaluación de los riesgos y procesos peligrosos existentes.

Planes de trabajo para abordar los diferentes riesgos y procesos peligrosos, los cuales deben incluir como mínimo:

Información y capacitación permanente a los trabajadores, las trabajadoras, los asociados y las asociadas.

Procesos de inspección y evaluación en materia de seguridad y salud en el trabajo.

Monitoreo y vigilancia epidemiológica de los riesgos y procesos peligrosos.

Monitoreo y vigilancia epidemiológica de la salud de los trabajadores y las trabajadoras.

Reglas, normas y procedimientos de trabajo seguro y saludable.

Dotación de equipos de protección personal y colectiva.

Atención preventiva en salud ocupacional.

Planes de contingencia y atención de emergencias.

Personal y recursos necesarios para ejecutar el plan.

Recursos económicos precisos para la consecución de los objetivos propuestos.

Las demás que establezcan las normas técnicas.

Identificación del patrono o patrona y compromiso de hacer cumplir los planes establecidos.

A efectos de desarrollar cada uno de los puntos que componen los Programas de Seguridad y Salud en el Trabajo, el empresario deberá hacerse valer de los requisitos

especificados en la Norma Técnica: Programa de Seguridad y Salud en el Trabajo (NT-01-2008).

Norma ISO 2372 proporciona guías para la aceptación de la amplitud de vibración, para maquinaria desde 600 hasta 1200 RPM. Especifica niveles de velocidad general de vibración en lugar de niveles espectrales, y puede ser muy engañosa, así como también especifica los límites de la velocidad de vibración en los caballos vapor de la máquina y cubre un rango de frecuencias desde 10 Hz hasta 1000Hz, debido al rango limitado de alta frecuencia, se puede fácilmente dejar pasar problemas de rodamientos con elementos rodantes.

2.4 Definición de términos básicos

Amplitud: es la distancia máxima de la onda del punto cero o del punto de equilibrio.

Análisis de vibraciones mecánicas: es una herramienta o método utilizado para identificar, predecir y prevenir fallas en las máquinas rotativas.

Fase: Fase es una medida de la diferencia de tiempo entre dos ondas senoidales. Aunque la fase es una diferencia verdadera de tiempo, siempre se mide en términos de ángulo, en grados o radianes.

Frecuencia: número de ciclos que ocurren en un segundo, y sencillamente es el recíproco del período.

Mantenimiento basado en confiabilidad: es una técnica de organización de las actividades y de la gestión del mantenimiento para desarrollar programas organizados que se basan en la confiabilidad de los equipos. Este asegura un programa efectivo de mantenimiento que se centra en que la confiabilidad original inherente al equipo se mantenga.

Mantenimiento: conjunto de actividades destinadas a establecer o mantener un bien en un estado o en unas condiciones funcionamiento con toda seguridad, para cumplir con esta función a realizarse.

Período: es el tiempo necesario para un ciclo, o para un viaje ida y vuelta, o de un cruce del nivel cero hasta el siguiente cruce del nivel cero en la misma dirección. El periodo se mide en segundos o milisegundos dependiendo de qué tan rápido cambie la onda.

Vibración: movimiento de vaivén de una maquina o elemento de ella en cualquier sentido del espacio desde su posición de equilibrio.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1 Tipo de Investigación

Esta investigación se enmarcará dentro de la modalidad de proyecto factible, ya que busca proponer una alternativa de solución a un problema planteado a través del desarrollo de un objetivo, como es el análisis de vibraciones mecánicas del refinador primario en la planta de pulpa de papeles venezolanos C.A mediante el método de mantenimiento predictivo basado en la confiabilidad (MPBC). Según el Manual De Trabajos De Grado De Especialización, Maestrías Y Tesis Del UPEL (2016), se entiende por proyecto factible: “la investigación, elaboración y desarrollo de una propuesta de un modelo operativo viable para solucionar problemas requerimientos o necesidades de organizaciones, así como grupos sociales, programas, tecnología, métodos o procesos”. (p.7).

3.2 Diseño de la investigación

La presente investigación se basará en una investigación de campo y documental. Según la UPEL (2016) en su manual de trabajo de grado de especialización, maestrías y tesis doctorales se entiende por investigación de campo, “el análisis sistemático de problemas en la realidad, con el propósito bien sea de describirlo, interpretarlos, entender su naturaleza y factores contribuyentes” (p.5).

La investigación de campo permite mantener estrategias claras en relación directa con la unidad en estudio. El estudio está basado en una investigación de campo, ya que permite a través de la observación directa, obtener datos directamente de la zona bajo estudio, recoger datos de la comunidad y describirla detalladamente para facilitar a los investigadores una absoluta claridad de los datos necesarios para el desarrollo de la propuesta

De igual manera, es una investigación de tipo documental ya que los investigadores utilizan fuentes como leyes, libros, manuales y normas para poder basarse, sustentar y profundizar la acción de investigación. Para el manual de trabajo

de grado de especialización, maestrías y tesis doctorales del UPEL (2016), “es el estudio de problemas con el propósito de ampliar y profundizar el conocimiento de su naturaleza, con apoyo, principalmente, en trabajos previos, información y datos divulgados por medios impresos” (p.6)

3.3 Nivel de la investigación

Arias (2012) señala: “El nivel de investigación se refiere al grado de profundidad con que se aborda un fenómeno u objeto de estudio” (p.23) Así mismo la investigación es de un nivel descriptivo, según Arias (2012) señala:” consiste en la caracterización de un hecho, fenómeno o grupo con el fin de establecer su estructura o comportamiento” (p.46).

De acuerdo a lo expresado anteriormente, la presente investigación es de tipo descriptiva, debido a que implica observar y describir el comportamiento de las variables necesarias para el desarrollo técnico de la propuesta a realizar.

3.4 Población y muestra

Según Balestrini (2006), define que la población “un conjunto finito o infinito de personas, casos o elementos, que presentan características comunes” (p.137). Así mismo Balestrini (2006) señala que " una muestra es una parte representativa de una población, cuyas características deben producirse en ella, lo más exactamente posible” (p. 141). Por lo que para este trabajo de investigación la población son los elementos que contiene el refinador primario y el motor eléctrico cuyos elementos son; para el motor eléctrico: estator, dos rodamientos, rotor, caja de conexiones, base, carcasa, bobinado, eje y el ventilador y los elementos del refinador primario son: carcasa, eje, dos cojinetes, dos discos de metro y medio de diámetro con cuchillas para moler la pulpa de papel, uno fijo y otro móvil.

Por otra parte, según Arias (2012), la muestra es “un subconjunto representativo y finito que se extrae de la población accesible”. (p. 83). Para el caso de este proyecto de investigación la muestra son los informes obtenidos en un período de tiempo escogido desde monitoreos hechos anteriormente hasta los que se van a registrar a lo largo del

presente año en Papeles Venezolanos C.A en el departamento de mantenimiento ubicado en planta de pulpa.

3.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos.

Según Sampier (2006) son “el proceso de obtención de datos e información útil para el desarrollo del sistema y procedimientos a proponer” (p.114). En el presente proyecto para obtener la información concerniente a la misma se aplicarán técnicas: Observación Directa y la revisión Documental y la entrevista no estructurada.

Observación Directa

Según Sampier (2006) “la observación directa, se entiende como un proceso deliberado, sistemático, dirigido a obtener información de forma directa del contexto donde tienen lugar las acciones” (S/N). La aplicación de esta técnica se llevará a cabo con la incorporación activa de los investigadores dentro de la empresa, haciendo las mediciones correspondientes.

Revisión Documental

Según el Manual para la elaboración de Trabajo de Grado de la Universidad Pedagógica Experimental Libertador (UPEL, 2016), “consiste en la etapa del modelo científico a través de la cual, el investigador reúne los antecedentes teóricos y las investigaciones anteriores existentes sobre el tema dado” (p.123). Dentro de esta perspectiva, dicha técnica se aplicará por medio de la revisión documental de los materiales escritos que se consultarán y que son de interés para esta investigación, que permitirán darle soporte y mayor veracidad al estudio realizado y obtener nuevos conocimientos del mismo.

Entrevista semi-estructurada

Es aquella en la que, como su propio nombre indica, se trabaja con una estrategia mixta, alternando preguntas estructuradas, con preguntas espontáneas. En ésta se van realizando preguntas de acuerdo a las respuestas que vayan surgiendo durante la entrevista. Según Arias, F (2012, p.74) define que “Aun cuando existe una guía de preguntas, el entrevistador puede realizar otras no contempladas inicialmente.

Esto se debe a que una respuesta puede dar origen a una pregunta adicional o extraordinaria. Esta técnica se caracteriza por su flexibilidad.”. En este sentido, se realizarán entrevistas semi-estructurada al personal involucrado, con el fin de recolectar la información necesaria de la problemática en estudio.

3.5.1 Instrumentos Utilizados en la recolección de Datos

Arias (2012) explica que “un instrumento de recolección de datos es cualquier recurso, dispositivo o formato, que se utiliza para obtener, registrar o almacenar información” (p.68). De allí pues, en el presente trabajo especial de grado se aplica el cuestionario como instrumento de recolección de datos.

Checklist

La lista de chequeo, es definida por Arias, F. (2012) como “un instrumento en el que se indica la presencia o ausencia de un aspecto o conducta a ser observada” (p.70). De tal modo, que la misma permitirá registrar los datos observados necesarios que conlleva la evaluación de las condiciones del entorno de trabajo de la empresa.

Análisis de Contenido

Para la aplicación de la revisión documental se utilizará el análisis de contenido, aplicando la metodología clásica propuesta por Tamayo, M y Tamayo (2001), que “consiste en realizar lecturas seriadas del texto a fin de identificar su estructura, construyendo un esquema con los principales contenidos” (p.47). En donde estos textos indican el, una vez obtenido el resultado, procedimiento para llevarlo a tablas y comparar los establecimientos en los textos nombrados, y así, poder dar un estado actual y establecer posteriormente una media.

3.6 Fases de la Investigación

FASE I Estudiar las diferentes técnicas de análisis de fallas usadas en el método de Mantenimiento Predictivo Basado en la Confiabilidad (MPBC).

Para realizar esta fase, se usará la recopilación de documentos de información, existente en la actualidad en investigaciones y los últimos estudios en cuestión al Mantenimiento Predictivo Basado en Confiabilidad (MPBC) así como también los

informes obtenidos en un período de tiempo escogido, para de esta manera, poder tener información verificada documentalmente y basarla posteriormente en los estudios que se realizaran en el presente trabajo de investigación.

FASE II Determinar los distintos modos de falla que se presentan en el refinador primario

Esta fase se completará con la comparación de la información obtenida en la fase anterior y la información sobre el refinador primario dando a conocer, que tipo de maquina es, modelo, tipo, como funciona, entre otro. Para hacer un análisis que permita identificar que modos de falla se presentaran en un tipo de maquina como es la presente en el proyecto de investigación. Posteriormente se le aplicara en base a lo explicado anteriormente, un análisis de vibraciones al refinador primario para obtener los distintos modos de falla que pueda presentar y así predecir estas fallas.

FASE III Evaluar los parámetros de funcionamiento requeridas por la compañía

Tomando en cuenta el análisis de vibraciones dicho en la fase anterior, se evaluará los resultados obtenidos del mismo y estos serán comparados con la normativa correspondiente para, principalmente, evaluar que cumpla con los parámetros necesarios para un funcionamiento en general.

Así mismo, se obtendrán datos, proporcionados por la empresa en cuestión sobre los parámetros de funcionamiento que requiere dicha empresa para el funcionamiento de la máquina de forma cotidiana.

FASE IV Elaborar el informe técnico sobre el resultado de los análisis de vibraciones del refinador primario aplicando el método de MPBC.

Con los datos obtenidos del análisis de vibraciones, que se presenta en la fase II, se recopilaran cada uno de dichos datos para proceder a realizar un informe técnico de dicho análisis en donde se explicara con argumentación teórica el método de Mantenimiento Predictivo Basado en Confiabilidad que será empleado para, tanto el

análisis como la realización del informe, y constatar que estos dos últimos serán hechos en base a este método propiamente dicho.

FASE V Proponer las acciones correctivas según el tipo de modo de falla de acuerdo a los parámetros exigidos por el fabricante del equipo, establecidas en las Normas

Una vez hecho el informe técnico del análisis de vibraciones este mismo se complementará con acciones correctivas que permitan evitar las predicciones de modos de falla que pueda tener el refinador primario, basadas en el análisis nombrado anteriormente, que serán presentadas por los autores del presente trabajo de investigación, todo esto bajo los parámetros del fabricante de la maquinaria y la normativa que se ha presentado en capítulos anteriores.

1. Estudiar las diferentes técnicas de análisis de fallas usadas en el método de Mantenimiento Predictivo Basado en la Confiabilidad (MPBC).
2. Determinar los distintos modos de falla que se presentan en el refinador primario.
3. Evaluar los parámetros de funcionamiento requeridas por la compañía.
4. Elaborar el informe técnico sobre el resultado de los análisis de vibraciones del refinador primario aplicando el método de MPBC.
5. Proponer las acciones correctivas según el tipo de modo de falla de acuerdo a los parámetros exigidos por el fabricante del equipo, establecidas en las Normas.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

4.1 Estudiar las diferentes técnicas de análisis de fallas usadas en el método de Mantenimiento Predictivo Basado en la Confiabilidad (MPBC).

El mantenimiento predictivo basado en confiabilidad MPBC es una metodología ampliamente reconocida y de uso extendido para elaborar planes de mantenimiento de equipos industriales basándose en asegurar las funciones del equipo para la satisfacción del usuario o propietario. Actualmente existen varias metodologías de MPBC, sin embargo, la esencia de esta metodología está contenida en la norma SAE JA1011. El MPBC es una técnica de organización de las actividades y de la gestión del mantenimiento para desarrollar programas organizados que se basan en la confiabilidad de los equipos. El MPBC asegura un programa efectivo de mantenimiento que se centra en que la confiabilidad original inherente al equipo se mantenga.

John Moubrey definió el MPBC como un proceso utilizado para determinar que se debe hacer para asegurar que cualquier activo continúe haciendo lo que sus usuarios quieren que haga en su contexto operacional. Este método de mantenimiento por ser el más eficaz en tema de reducir costos y evitar paradas no programadas, se ha desarrollado diferentes técnicas de mantenimiento predictivo basado en la confiabilidad los cuales son: análisis de vibraciones, ultrasonido, ensayos no destructivos, balanceo dinámico, balanceo estático, alineación laser de ejes, alineación laser de poleas y cámara termográfica.

Entre las técnicas antes mencionadas nos vamos a enfocar en el área de ensayos no destructivos, de los cuales también se subdividen en las siguientes: ultrasonido, inspección visual, líquidos penetrantes, análisis de vibraciones mecánicas, análisis de aceite, entre otros. Cada tipo de ensayo no destructivo es esencial para no

maltratar y desgastar el equipo en el cual se esté trabajando sin alterar el funcionamiento de la misma. Como se puede observar el mantenimiento predictivo basado en confiabilidad es un tema muy amplio, con sus técnicas y tipos de mantenimiento, por lo cual nos vamos a centrar en el área de análisis de vibraciones mecánicas, pero primero hay que saber qué ventajas nos ofrece este tipo de ensayo no destructivo.

4.2 Determinar los distintos modos de falla que se presentan en el refinador primario.

4.2.1 Medición

Es importante resaltar que, cualquier tipo de máquina posee un cierto grado de vibración así esta se encuentre funcionando de manera óptima, estos niveles normales de vibración tienen un rango y amplitud. Cuando estos parámetros salen de dichos estándares es un indicativo predictivo de fallas de la máquina. Todo esto contemplado por el análisis de vibraciones. Para la recolección de datos se requiere de equipo específico para realizar un análisis correcto. El equipo el cual se utilizó para la recolección de datos fue:

SKF microlog de la serie GX-CMXA 75: consiste en un terminal portátil, ligero y con cuatro canales, destinado a recopilar y almacenar datos. posibilita el análisis detallado del estado de la maquinaria de diversos entornos industriales en condiciones adversas. De forma automática, recopila mediciones dinámicas (vibración) y estáticas (proceso) de prácticamente cualquier fuente. Las mediciones de vibraciones se obtienen mediante una sonda portátil, una sonda montada magnéticamente, sensores montados de forma permanente o un sistema de supervisión instalado. Posee un acelerómetro encargado de ser el receptor de información el cual transmite mediante las sondas y sensores antes mencionados conectados a uno de los canales del medidor de vibración para medir la velocidad, aceleración a través de las vibraciones mecánicas, y lleva esta información necesaria al dispositivo. (ver figura 17).



Figura 17. SKF microlog serie GX-CMXA-75

Fuente: skf.com

4.2.2 Toma de los datos

Para la toma de los datos, fue de suma importancia saber la ubicación de los puntos en donde se tomaron las mediciones, ya que, se buscó tener el transductor lo más cerca posible del rodamiento, es decir, buscar contacto directo con metal sólido entre el rodamiento y el sensor. Por lo cual, se evitaron ubicarlos donde se encontraban gorros de rodamiento o cualquier parte que tuviera poca conducción de la energía de vibración. Así mismo, dentro de lo posible, se evitó colocarlo donde había juntas de metal-metal, entre el rodamiento y el sensor, como por ejemplo juntas entres campana y carter, carters de ventiladores y extremidades de motores.

Además, según White, G. (2010) “para motores de más de 50 HP cada rodamiento debería de tener su propio punto de prueba”. Con este conocimiento, en el caso de este proyecto de investigación, siendo la máquina estudiada un refinador industrial, y que este posee un motor de 6k HP, fue necesario tener un punto de prueba en sus

rodamientos además de los del motor. En la figura 18 se puede apreciar los esquemas en donde se indican los puntos a tomar las pruebas.

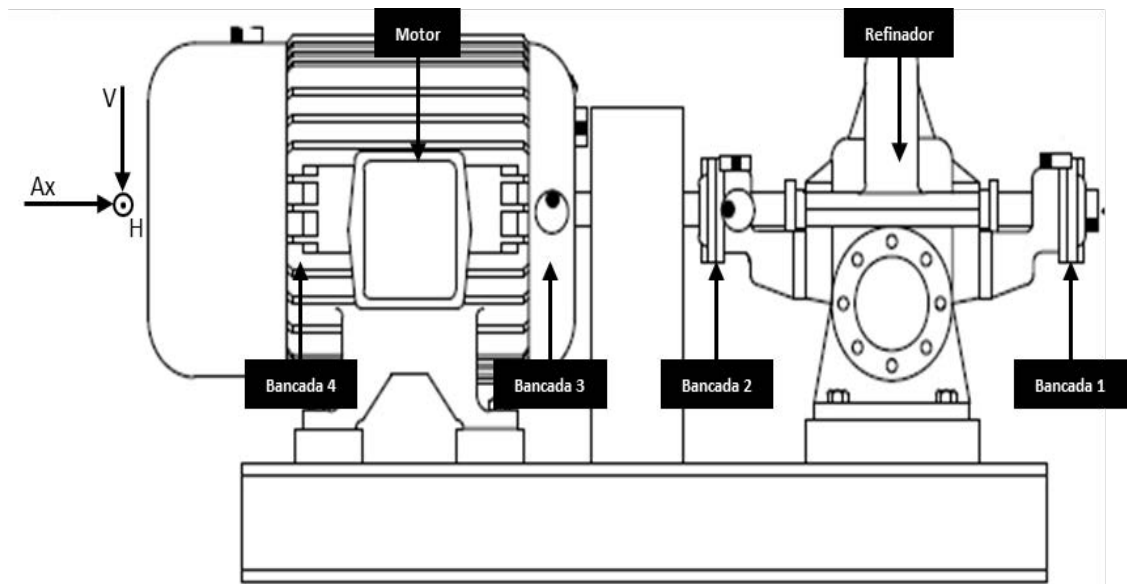


Figura 18. Esquema de puntos de apoyo del refinador primario de PAVECA (vista horizontal).

Fuente: Rondón, J & Salcedo, C

Luego de establecerse los puntos para las medidas, los operadores siguieron un orden desde la parte delantera a la trasera empezando por el refinador, ya que suelen ser los puntos de fácil acceso, un orden diferente no afectaría el análisis. (ver anexo c).

Siguiendo los escritos de White, G. (2010) “en la determinación de problemas de máquinas es muy útil obtener datos de vibración de cada punto de medición en tres direcciones estas direcciones se llaman axial, vertical, y horizontal. Axial es la dirección paralela a la flecha, vertical es la dirección desde el transductor hacia el centro de la flecha, y horizontal se toma 90 grados de vertical, tangente a la flecha”, las mediciones en cada punto de apoyo se realizaron en diferentes planos del motor, generalmente (esto sin ser una regla) se empezó por el horizontal. Se colocó el acelerómetro del analizador en cada punto seleccionado o bancada identificado en la

figura. 19, donde se muestra el correcto posicionamiento del acelerómetro para la toma de muestra.

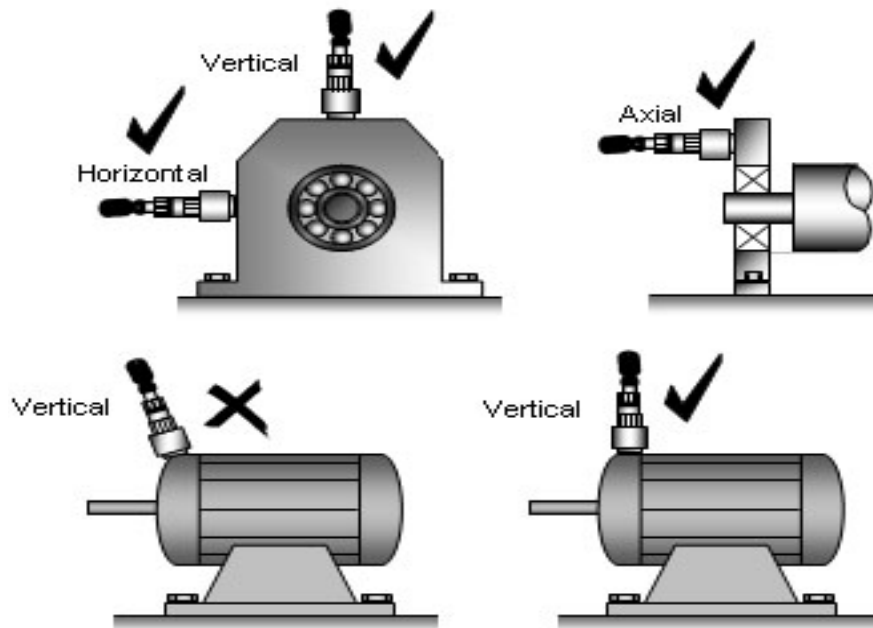


Figura 19. Esquema posicionamiento correcto del acelerómetro.

Fuente: Vargas Henríquez, (2018)

Según el manual SKF las mínimas medidas son cuando: Durante el proceso de obtención de datos, los tres indicadores de la pantalla, situados en la parte superior derecha, muestran el estado de la medición conforme tiene lugar la recopilación de datos. La pantalla de obtención de datos se describe a continuación.

Color ámbar solamente: obtención de datos en curso.

Color verde solamente: obtención de datos finalizada; los resultados de la medición no son de alarma.

Color rojo y verde: obtención de datos finalizada; los resultados de la medición son de alarma.

Azul: se enciende una LED azul cuando Microlog establece la comunicación con el software SKF @ptitude Analyst.

Rojo y azul comparten el mismo LED, por lo tanto, si el dispositivo se está cargando cuando se establecen las comunicaciones, se observa un LED de color rosa. los resultados de la medición no son de alarma.

Así que para las pruebas del presente proyecto de investigación se procedió a poner en marcha el analizador en los diferentes planos horizontal, vertical, axial (cada una de ellas en mm/s) y aceleración envolvente (Ge), en un periodo de 10 segundos por cada plano con un resultado de cinco datos cada dos segundos por plano mediante el analizador de vibraciones. Siendo estos los parámetros utilizados por los operadores de la empresa **NCI Servicios industriales C.A.** A continuación, en el cuadro 14 se presenta un cuadro con las imágenes del operador realizando la toma de datos en cada una de las posiciones indicadas. Además, en el Anexo se encuentra un link al video de la toma de muestras realizada por los operadores.

Cuadro 14. Imágenes de las tomas de datos.

Toma de datos Bancada 1		
Horizontal	Vertical	Axial
		

Toma de datos Bancada 2

Horizontal

Vertical

Axial



Toma de datos Bancada 3

Horizontal

Vertical

Axial



Toma de datos Bancada 4

Horizontal

Vertical

Axial



Fuente: Cristóbal Salcedo & José Rondón

Para el cumplimiento del este segundo objetivo específico, tomando en cuenta que la técnica escogida es el análisis de vibraciones, se procedió con las mediciones respectivas del mismo. Una vez en la empresa con todos los instrumentos y equipos de medición necesarios, con la colaboración del ingeniero a cargo de la compañía NCI Servicios industriales se tomaron las mediciones del refinador primario de la siguiente manera:

Paso 1: primero se verificó el entorno donde se encuentra el refinador primario siguiendo Normas de seguridad OHSAS.

Paso 2: El acelerómetro tiene integrados en su panel sensorial dos imanes que sirven para tener un apoyo firme en los puntos de apoyo explicados en la figura 18 anexada anteriormente.

Paso 3: se anotaron los datos por cada medición que arrojó el analizador, en este caso cuatro por plano.

Paso 4: con los datos obtenidos en el paso anterior, se procedió a evaluar dichos datos con los estándares de las tablas normativas ISO 10816-1, 10816-3. Para así obtener un resultado del estado de la máquina.

Paso 5: Una vez obtenidos los datos del análisis se compararon con los cuadros de diagnóstico de vibraciones del capítulo 2.2.8 para obtener los distintos modos de falla que pueda presentar el refinador primario con el fin de poder realizar un correcto análisis de datos, obteniendo así, unos resultados que poseen lo necesario para determinar específicamente las posibles fallas de la máquina en cuestión.

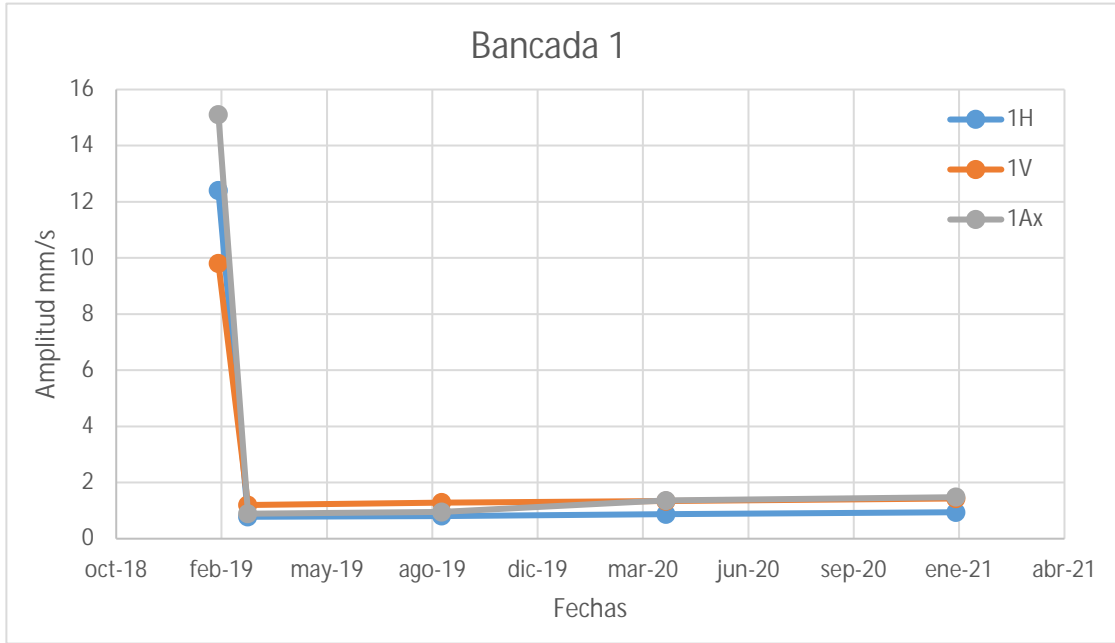
4.3 Evaluar los parámetros de funcionamiento requeridas por la compañía

Una vez realizada la toma de datos con el analizador, estos datos son vaciados por operadores de la empresa **NCI Servicios Industriales C.A** en un informe técnico en donde se presentan los datos obtenidos de cada plano en cada punto o bancada seleccionados para dar reporte a la empresa que requiere los servicios, en nuestro caso **Papeles Venezolanos C.A (PAVECA)**. Dichos datos fueron transcritos por los autores con la finalidad de presentar los datos que presentan relevancia para el análisis, estos se representan como las amplitudes por plano o posición del acelerómetro según la bancada en la que se tomaron las medidas y su fecha correspondiente, además resaltando el color que representa según la **Figura 10** ISO 10816-1 resumidos en el cuadro 15 que se aprecia a continuación.

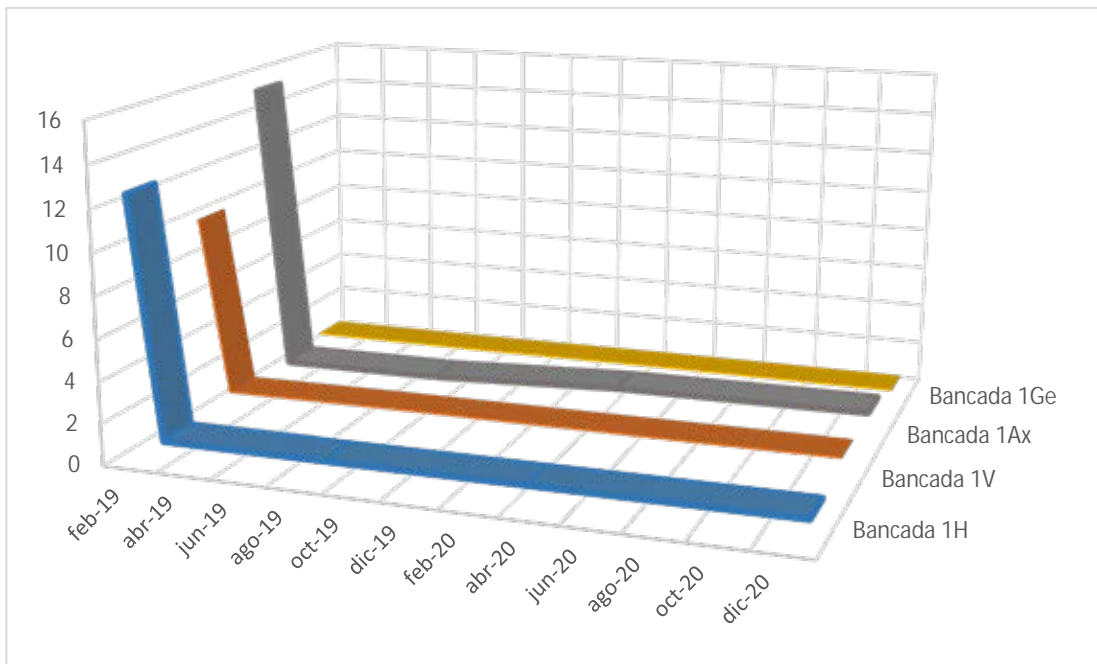
Cuadro 15. Resumen de los datos

Fuente: Cristóbal Salcedo & José Rondón

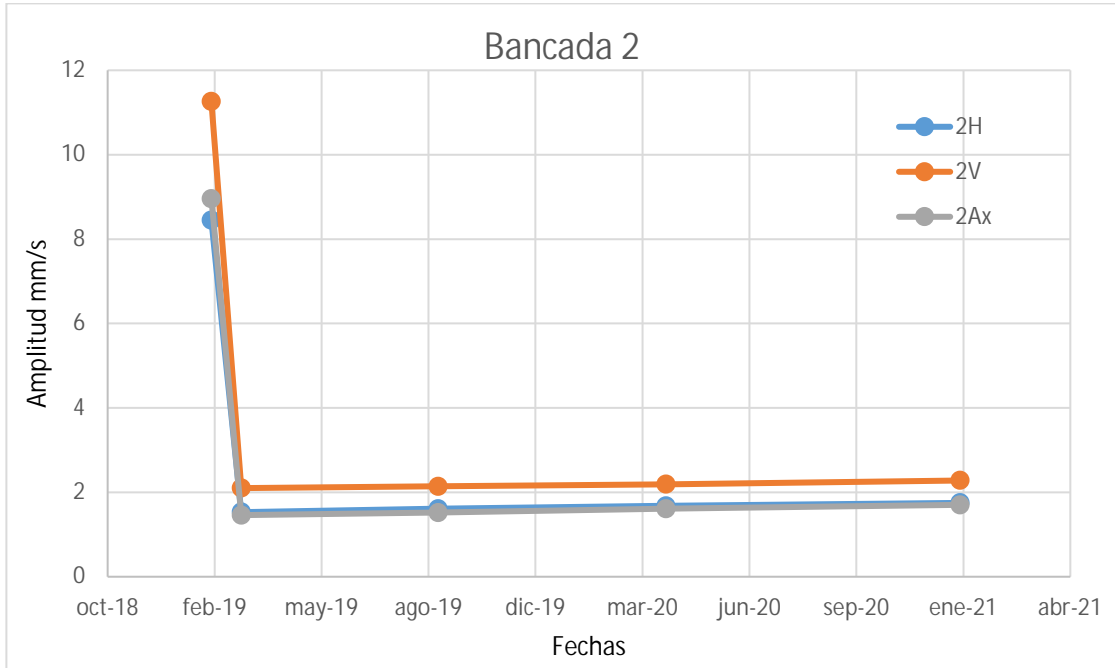
De dicha tabla, los autores realizaron las gráficas correspondientes a cada una de las bancadas con el fin de analizar la evolución del estado de cada una de ellas de manera lineal, cabe destacar que esta manera de presentar los valores de cada una de las posiciones o planos en donde se tomaron los datos, en conjunto, muestra el estado de la maquina en el tiempo. Esta curva al mostrarse de manera lineal y tener valores similares entre planos, algunas líneas se superponen a otras, por lo cual, cada grafica estará seguida de una gráfica equivalente, pero en vista 3D para mayor aprecio de la curva para su análisis, las cuales se presentan desde la gráfica 1 a la 9.



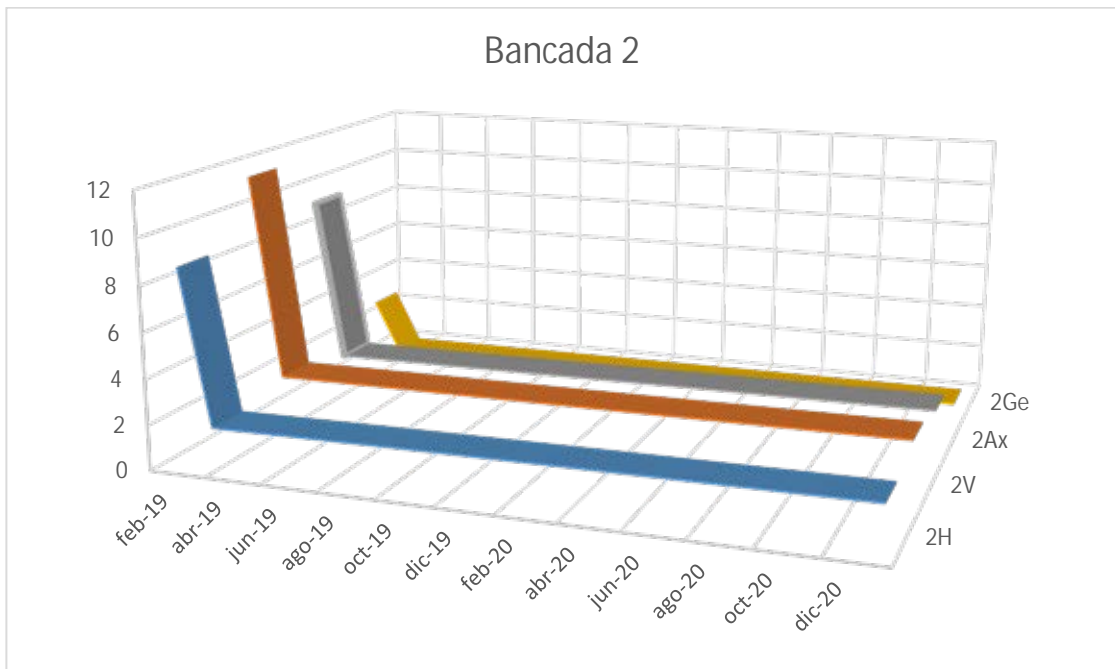
Gráfica 1 Lineal bancada 1. Amplitud (mm/s) - Tiempo



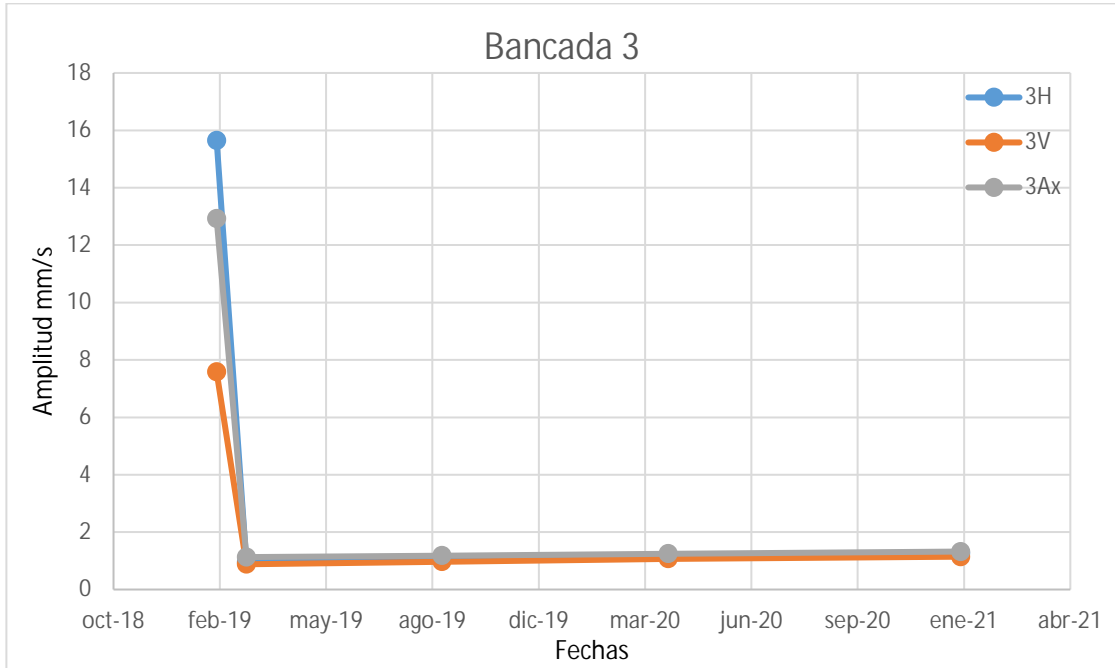
Gráfica 2 3D bancada 1. Amplitud (mm/s) – Tiempo



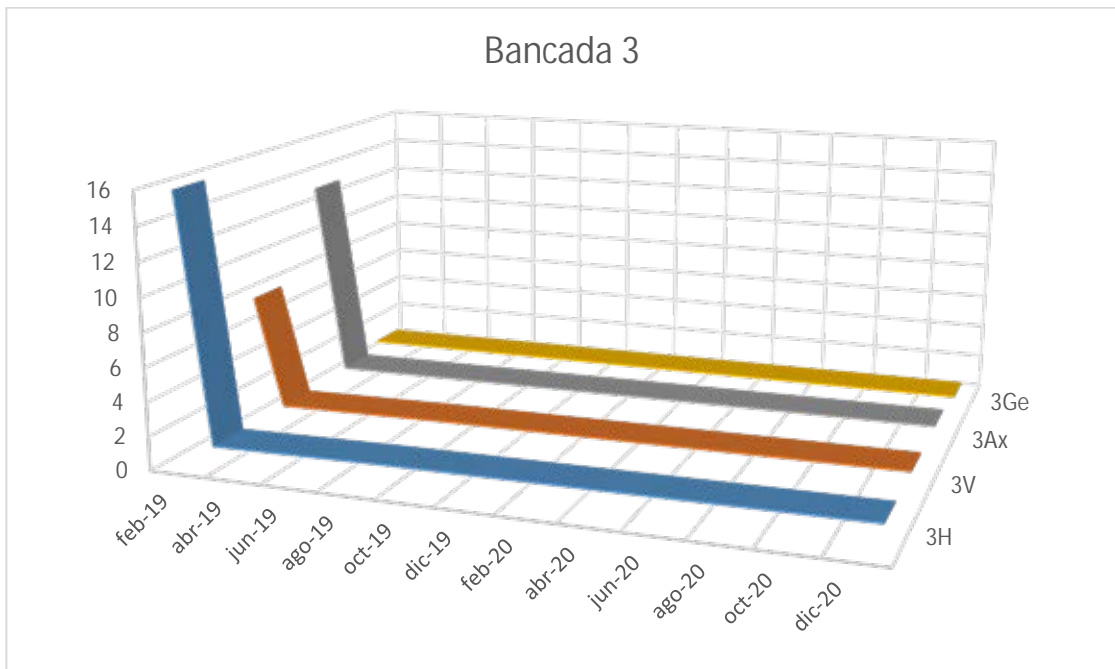
Gráfica 3 Lineal bancada 2. Amplitud (mm/s) – Tiempo



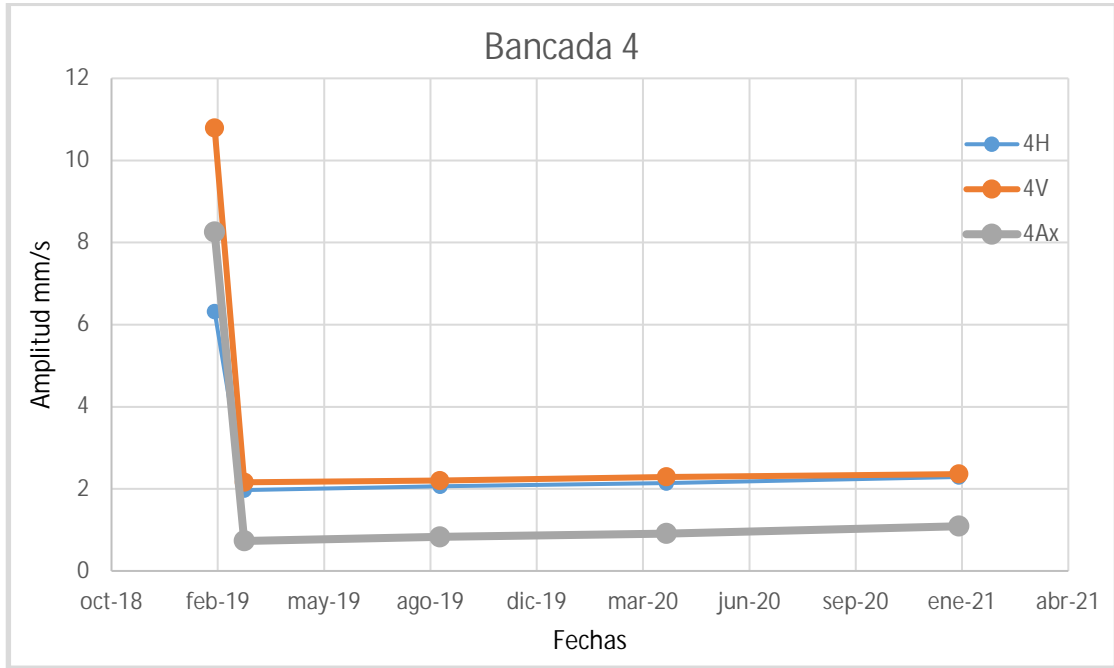
Gráfica 4 3D bancada 2. Amplitud (mm/s) – Tiempo



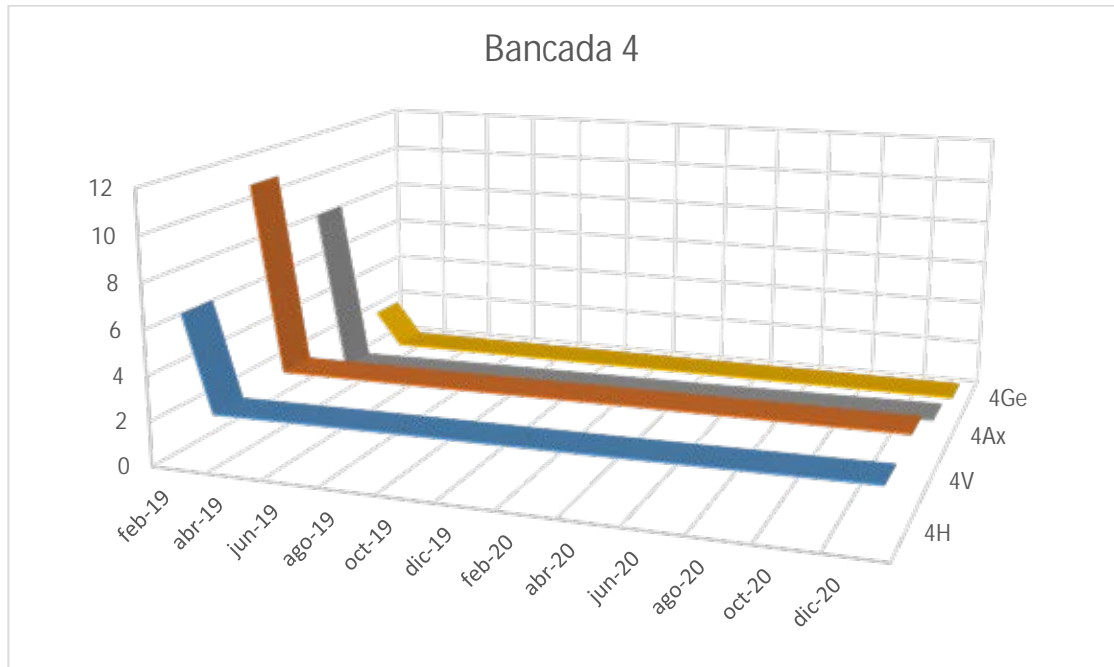
Gráfica 5 Lineal bancada 3. Amplitud (mm/s) – Tiempo



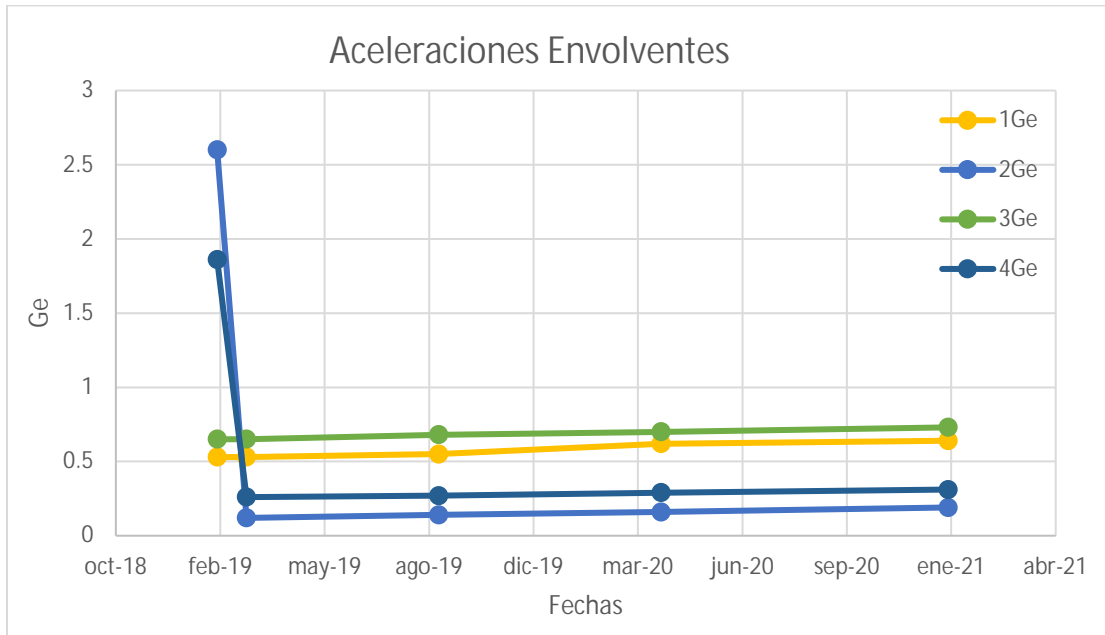
Gráfica 6 3D bancada 3. Amplitud (mm/s) – Tiempo



Gráfica 7 Lineal bancada 4. Amplitud (mm/s) – Tiempo



Gráfica 8 3D bancada 4. Amplitud (mm/s) – Tiempo



Gráfica 9 Aceleraciones envolventes de cada bancada (Ge) – Tiempo

Fuente: Cristóbal Salcedo & José Rondón

En la gráfica presentada se puede apreciar la Amplitud (mm/seg) vs tiempo (mes) de cada una de las bancadas en las que se hizo el análisis de vibraciones. Cada línea representa un plano de la bancada (H, V, Ax y Ge) identificadas por color (Azul, naranja, gris y amarillo respectivamente) e indica una posición en la cual se tomó la muestra en esa bancada, es decir, por fechas se tendrá un resultado de amplitud, estos tomados de forma casi periódica de aproximadamente dos meses, desde febrero 2019 hasta diciembre 2020.

Se puede ver que las gráficas empiezan con unos valores altos para la fecha de feb-19 con respecto a los de abr-19 estos oscilando entre los valores de 13,5 mm/s, los cuales según la **Figura. 10** ISO 10816-1, sobrepasa por varias unidades los valores inaceptables según dicha ley para el funcionamiento de la máquina. Además, cada bancada representa valores como los descritos en distintos planos o posiciones en las que fueron analizadas, empezando por la toma de feb-19, estas poseen lo siguiente:

En la bancada 1 se visualiza que, la línea gris correspondiente a la posición Axial para la primera toma esta presenta una amplitud mayor a la primera toma o punto de la línea azul (plano horizontal) y el primer punto de la línea naranja (posición vertical), lo cual significa, según el cuadro de diagnóstico de vibraciones 2.2.8, la máquina presenta altos niveles de desalineación.

En la bancada 2 se encuentra con una situación distinta, la línea naranja que es la posición vertical en su primer análisis es la más alta con un valor de 11,26, eso quiere decir, según el cuadro de diagnóstico de vibraciones 2.2.8, que en el lado carga del refinador existe una holgura mecánica debido a desgaste en los rodamientos o en el eje de la máquina y ese espacio crea altas vibraciones en la máquina.

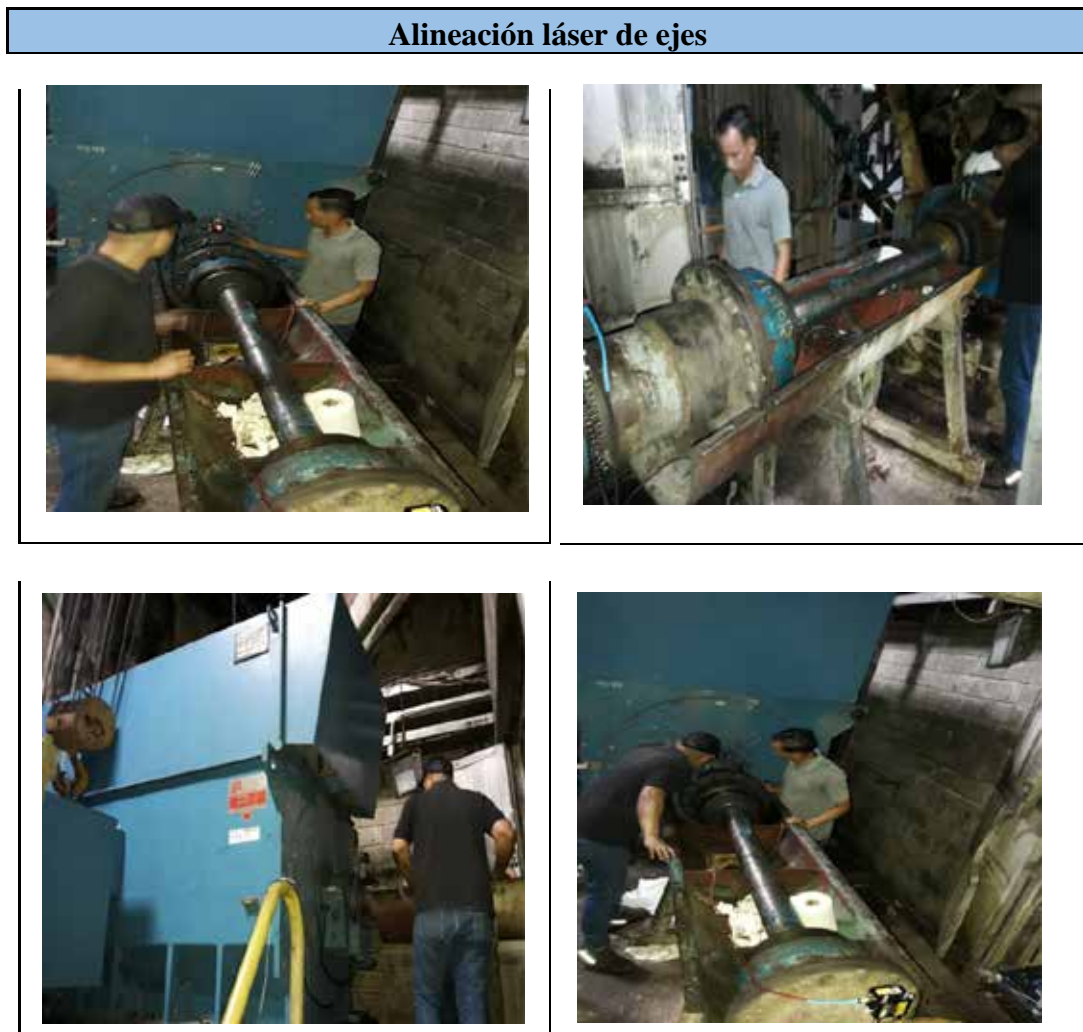
La bancada 3 se puede observar que la primera toma de la línea azul, correspondiente a la posición horizontal, es mayor con un valor de 15,65 que las demás líneas, esto significa que el motor eléctrico tiene altos grados de desbalanceo perjudiciales para el funcionamiento del mismo, Según el cuadro de diagnóstico de vibraciones 2.2.8, por ello sus valores en la posición horizontal tienden a ser mayores con respecto a las demás líneas.

Y por último la bancada 4 que presenta un caso similar a la bancada 2, el cual se muestra que la primera toma de la línea naranja, posición vertical, tiene valores de 10,79 con respecto a las demás líneas y como se explicó en la bancada 2 eso significa que ese rodamiento está desgastado y por ello presenta una holgura mecánica en la máquina.

Por estas razones, la empresa **Papeles Venezolanos C.A (PAVECA)** al ver estos datos de feb-19 presentados procedió a aprobar orden a la empresa **NCI Servicios Industriales C.A**, para hacerle un mantenimiento correctivo en el cual realizaron un cambio de rodamientos, alineación laser de ejes y balanceo, en el cuadro 16 se muestra dicho manteniendo realizado por el personal encargado. Por lo cual, se nota que la toma de datos siguiente correspondiente a la fecha de abr-19 muestra datos de amplitudes en rangos sumamente bajos comparados a los de su muestra anterior, estos entre valores de 0.73 hasta un máximo de 1,49, valores en el rango óptimo de la

norma, indicando así, que el mantenimiento se llevó a cabo de manera satisfactoria. En el cuadro 16 mostrado a continuación, se encuentran las imágenes del mantenimiento correctivo realizado, específicamente la alineación laser de ejes.

Cuadro 16. Imágenes del mantenimiento correctivo hecho al refinador



Fuente: Cristóbal Salcedo & José Rondón

En las gráficas se puede observar que presentan condiciones similares en las cuales se aprecia que se superponen unas con otras líneas, además, estas líneas crecen de con una pendiente muy pequeña como se puede ver en las gráficas presentadas, esto indica que, el mantenimiento correctivo llevado a cabo se realizó de manera exitosa,

entendiendo que, en cada una de las posiciones de la bancada, el comportamiento con respecto a su amplitud de velocidad es similar.

Es importante destacar, la similitud entre bancadas 1 y 3 (gráfica 1 y gráfica 5), en donde, después del mantenimiento correctivo, las amplitudes tomadas empiezan debajo de 2 mm/s y estas muchos más cercanas, e incluso, algunas superpuestas en varios tramos, como en las bancadas 2 y 4 (gráfica 2 y gráfica 7), en donde, las posiciones verticales y horizontales de cada bancadas comienzan, después del mantenimiento correctivo, a partir de 2 mm/s y subiendo ligeramente, mientras que, la posición axial se queda por debajo de esta cifra de igual manera con poca pendiente.

La razón por la cual la mayoría de los valores empiezan por debajo de 2 mm/s se debe a que el mantenimiento correctivo del refinador fue efectuado correctamente, tomando en cuenta que el lado carga del motor eléctrico que impulsa el refinador, fue colocado un rodamiento de mayor capacidad debido a que el lado carga tiende a desgastarse mucho más rápido porque, como su nombre lo dice, es el lado que recibe toda la carga del proceso de producción, el cual gracias a la Norma 10816-1 y al criterio de severidad para aceleración envolvente explicado anteriormente, se puede observar que se mantienen los valores de las bancadas 1, 2, 3 y 4 ascendiendo de manera constante pero, con la condición de que no haya ningún esfuerzo o accidente en la planta, si no ocurre ningún agente externo que no sea el tiempo de producción de la misma los valores ascenderán muy lentamente.

4.4 Elaborar el informe técnico sobre el resultado de los análisis de vibraciones del refinador primario aplicando el método de MPBC

Con el registro de resultados obtenidos, tomando en cuenta que el comportamiento esperado por una máquina en desgaste sea de forma creciente a través del tiempo, es decir, de manera exponencial (dependiendo del aumento según el tiempo la velocidad con la que crezca la curva) y a falta de datos como el tiempo entre fallas, tomando en cuenta que la falla sería considerada como un estado en el cual la maquina salga de norma, que para el caso de estudio estaría presente una sola vez en el grafico en el tiempo, por esta razón, no habría al menos otro con el cual medir al

menos una cantidad de tiempo entre fallas. Dato crucial para el cálculo de las curvas predictivas más comunes usadas en el mantenimiento predictivo basado en confiabilidad.

Por lo tanto, los autores se basaron en buscar una curva que se aproximara mediante una curva de tendencia al comportamiento de los datos obtenidos como resultados, a manera de predicción (basándose en lo comentado en el párrafo anterior) de forma exponencial. Tomando como primera toma la inspección después del mantenimiento correctivo correspondiente a la fecha de marzo-19, es decir, sin tomar en cuenta el análisis de vibraciones tomados en el momento crítico de la máquina, ya que, al aproximar una curva de tendencia con datos exageradamente alejados, como lo es en el caso de dicha toma, la curva de tendencia no daría valores aproximados a la curva real de los datos.

Una vez obtenidas las ecuaciones de las curvas de tendencia de cada posición por bancada y sustituir el valor de Y por 11,2 mm/s, el cual es el punto máximo permitido por la norma ISO 10816-1 del grupo III de la **Figura 10**. Para luego posteriormente, despejar y obtener la incógnita del mes esperado, luego dividirlo por 12 meses (para tener datos en años), y así determinar que la posición y bancada seleccionada estén al límite de la norma en cuestión. Estos datos fueron recabados por los autores y transcritos en el cuadro 17, presentado a continuación:

Cuadro 17. Proyecciones de las bancadas

Bancada	posicion	Tiempo Proyectado (años)
1	H	23,478
	V	22,102
	Ax	7,678
	Ge	11,001
2	H	25,085
	V	19,102
	Ax	22,098
	Ge	10,377
3	H	15,322
	V	40,088
	Ax	24,541
	Ge	16,684
4	H	19,621
	V	38,379
	Ax	11,703
	Ge	18,980

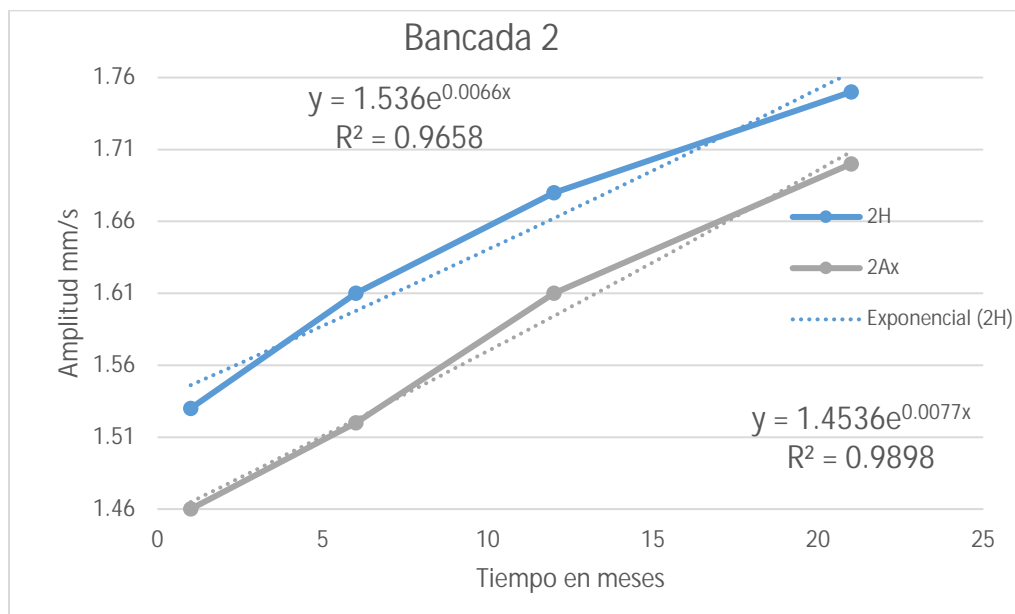
Fuente: Cristóbal Salcedo & José Rondón

En la bancada 1 (lado libre del refinador) correspondiente a la gráfica 1, se puede observar con una línea de tendencia establecida exponencialmente, la cual indica cuando el refinador va a llegar a su punto de peligro de falla 11,2 mm/s, establecido por la Norma ISO 10816-1 del Grupo III antes de que ocurra dando como resultado en las posiciones H y V un tiempo de 23 y 22 años respectivamente.

En la posición Ax de la gráfica 3, se puede ver un punto crítico de duración de peligro de falla 11,2 mm/s de 7 años. Esto pasa debido a que, en el tiempo de producción del refinador las vibraciones que se van produciendo a lo largo de su vida útil va provocando una desalineación del motor-refinador de la tabla 2.2.8 del cuadro de diagnóstico de vibraciones, el cual tiene que ser atendido con un período de tiempo más corto. Al trabajar sin los correctos ajustes la posición Ax va a llegar a su punto de peligro de falla 11,2 mm/s en dicha fecha.

La Aceleración envolvente G_e en la bancada 1 representada en la gráfica 9, se tiene un punto de peligro de falla de 2 G_e establecido por el criterio de severidad para aceleración envolvente con un tamaño de eje de 50 a 300 mm y una velocidad de 500 a 1800 rpm, el cual llega a su punto de peligro de falla 2 G_e en años ya que, el punto crítico tiende a ser más prolongado con respecto al tiempo.

En la bancada 2 (lado carga) mostrada en la gráfica 10, se puede observar con una línea de tendencia establecida exponencialmente, la cual indica cuando el refinador va a llegar a su punto de peligro de falla 11,2 mm/s, establecido por la Norma mencionada anteriormente antes de que ocurra dando como resultado en las posiciones H y Ax un tiempo de 25 y 22 años respectivamente como se indica en el Cuadro 17.



Gráfica 10. Curvas de tendencia de las posiciones H y V de la bancada 2.

Fuente: Cristóbal Salcedo & José Rondón

En la posición V según el cuadro 17, se puede ver un punto crítico de duración de peligro de falla 11,2 mm/s de 19 años. Esto pasa debido a que, este es el lado carga, es el lado que recibe directamente la carga, valga la redundancia, entre el motor y el refinador, por ello proyecta una tendencia a desgastarse más rápido que el lado libre

del mismo presentando una holgura mecánica que se explica en la tabla 2.2.8 del cuadro de diagnóstico de vibraciones, el cual tiene que ser atendido con un período de tiempo más corto. Al trabajar sin los correctos ajustes, la posición V va a llegar a su punto de peligro de falla 11,2 mm/s en 19 años.

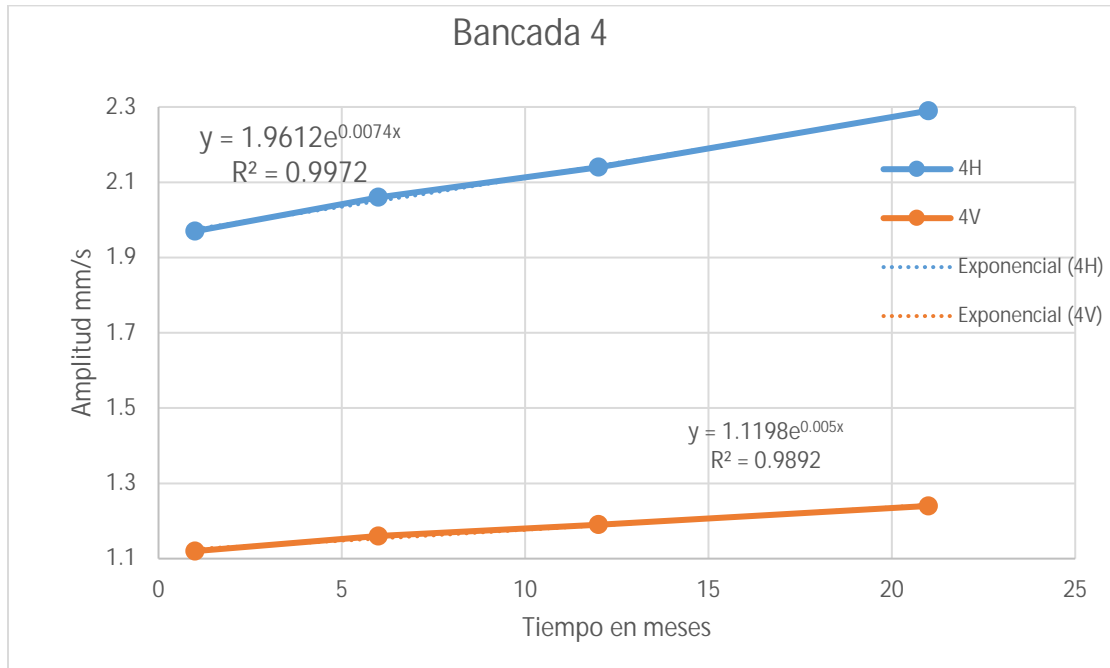
La Aceleración envolvente G_e en la bancada 2 observada en la gráfica 8, se tiene un punto de peligro de falla de 2 G_e establecido por el criterio mencionado anteriormente, el cual llega a su punto de peligro de falla 2 G_e en años ya que, el punto crítico en el lado carga tiende a desgastarse en un período de tiempo más corto.

En la bancada 3 (lado carga del motor) se puede observar con una línea de tendencia establecida exponencialmente, la cual indica cuando el motor eléctrico va a llegar a su punto de peligro de falla 11,2 mm/s, antes de que ocurra dando como resultado en las posiciones V y Ax un tiempo de 40 y 24 años respectivamente.

En la posición H se puede ver un punto crítico de duración de peligro de falla 11,2 mm/s de 15 años. Esto pasa debido a que, en el tiempo de producción del motor eléctrico las vibraciones que se van produciendo a lo largo de su vida útil va provocando un desbalanceo del motor-refinador explicado en la tabla 2.2.8 del cuadro de diagnóstico de vibraciones, el cual tiene que ser atendido con un período de tiempo más corto. Al trabajar sin los correctos ajustes la posición H va a llegar a su punto de peligro de falla 11,2 mm/s en 15 años.

La Aceleración envolvente G_e en la bancada 3 mostrada en la gráfica 9, se tiene un punto de peligro de falla de 2 G_e , el cual llega a su punto de peligro de falla 2 G_e en años ya que, el punto crítico en el lado carga del motor se le colocó un cojinete reforzado establecido por el manual del fabricante, el cual ayuda a que el desgaste del cojinete tenga un tiempo de desgaste más prolongado.

En la bancada 4 (lado libre del motor) se puede observar con una línea de tendencia establecida exponencialmente, la cual indica cuando el refinador va a llegar a su punto de peligro de falla 11,2 mm/s, mencionado anteriormente antes de que ocurra dando como resultado en las posiciones H y V un tiempo de 19 y 38 años respectivamente.



Gráfica 11. Curvas de tendencia de las posiciones H y V de la bancada 4.

Fuente: Cristóbal Salcedo & José Rondón

En la posición Ax se puede ver un punto crítico de duración de peligro de falla 11,2 mm/s de 11 años según el Cuadro 17. Esto pasa debido a que, en el tiempo de producción del motor eléctrico las vibraciones que se van produciendo a lo largo de su vida útil va provocando una desalineación del motor–refinador explicado en la **tabla 2.2.8** del cuadro de diagnóstico de vibraciones, el cual tiene que ser atendido con un período de tiempo más corto. Al trabajar sin los correctos ajustes la posición Ax va a llegar a su punto de peligro de falla 11,2 mm/s en 11 años.

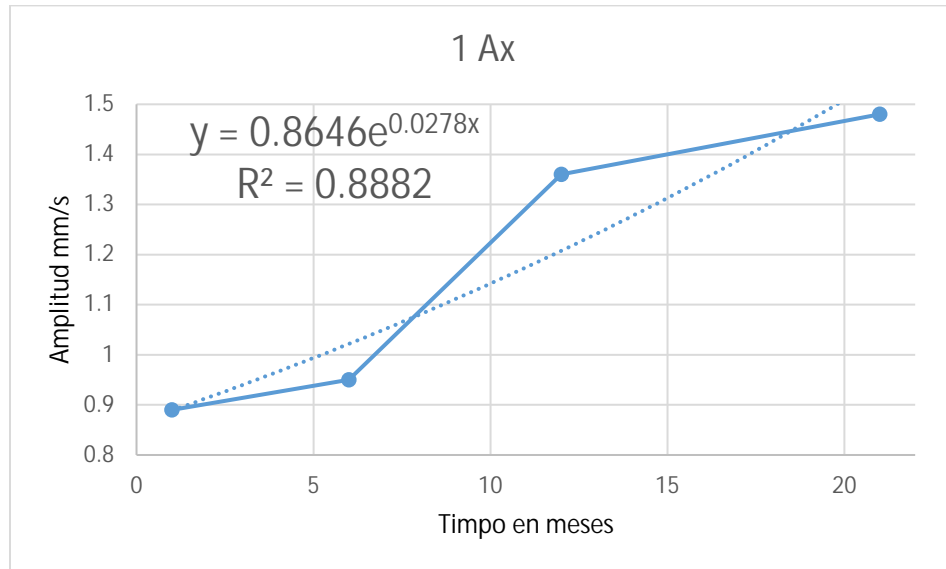
La Aceleración envolvente Ge en la bancada 4 gráfica 9 se tiene un punto de peligro de falla de 2 Ge criterio mencionado anteriormente, el cual llega a su punto de peligro de falla 2 Ge en años ya que, el punto crítico en el lado libre tiende a desgastarse en un período de tiempo más prolongado.

Como se puede notar, las cantidades estimadas por este método son demasiado conservadoras, tomando en cuenta que un experto dio un pronóstico de un estimado de

5 años para que se salieran de la norma algunas posiciones de las bancadas. Esto es debido a que, las proyecciones fueron realizadas, según se ha visto, de manera exponencial, por las razones argumentadas anteriormente. Haciendo que, como consecuencia, los datos obtenidos son de la fase temprana de la curva, por lo cual, las velocidades que posee una posición desde una toma a otra, considerando que el tiempo entre toma es aproximadamente 7 meses, no varían de forma relevante.

Además, esto causa que, la curva de tendencia (curva usada para la proyección), se desplace mucho más lenta en el eje X (tiempo), dando como resultado las proyecciones presentadas. Sin embargo, de dichas proyecciones existen, las más bajas entre todas (estas resaltadas en el cuadro), las cuales presentan un evidentemente una dispersión más agresiva entre los puntos de toma de datos. Esto implica que, dichas posiciones son puntos críticos y, por ende, los probables en llegar al punto máximo permitido por la norma, en cuanto a velocidad se refiere.

Es importante destacar, que como mínimo dos puntos más de toma de datos, en el lapso promedio de tiempo en el que se han realizado, puede variar mucho más respecto a sus otros puntos de la curva, esto implica que, la curva de tendencia exponencial tendría más que su fase temprana y esta crecería de una manera más rápida o agresiva con respecto a la usada para la proyección. De igual manera, los puntos críticos que se obtendrían serían los mismos siendo el más afectado la bancada 1 en su posición Ax (axial). En la gráfica 12, se presenta dicha posición y la formula usada para la proyección:



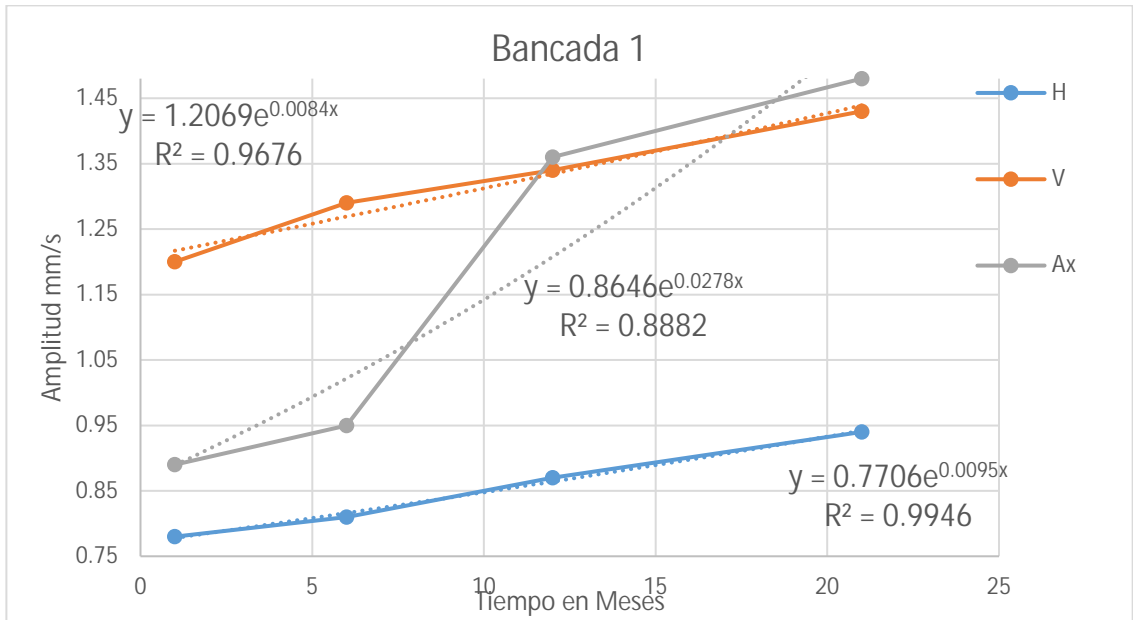
Gráfica 12. Cuerva de tendencia de posición crítica Ax Bancada 1.

Fuente: Cristóbal Salcedo & José Rondón

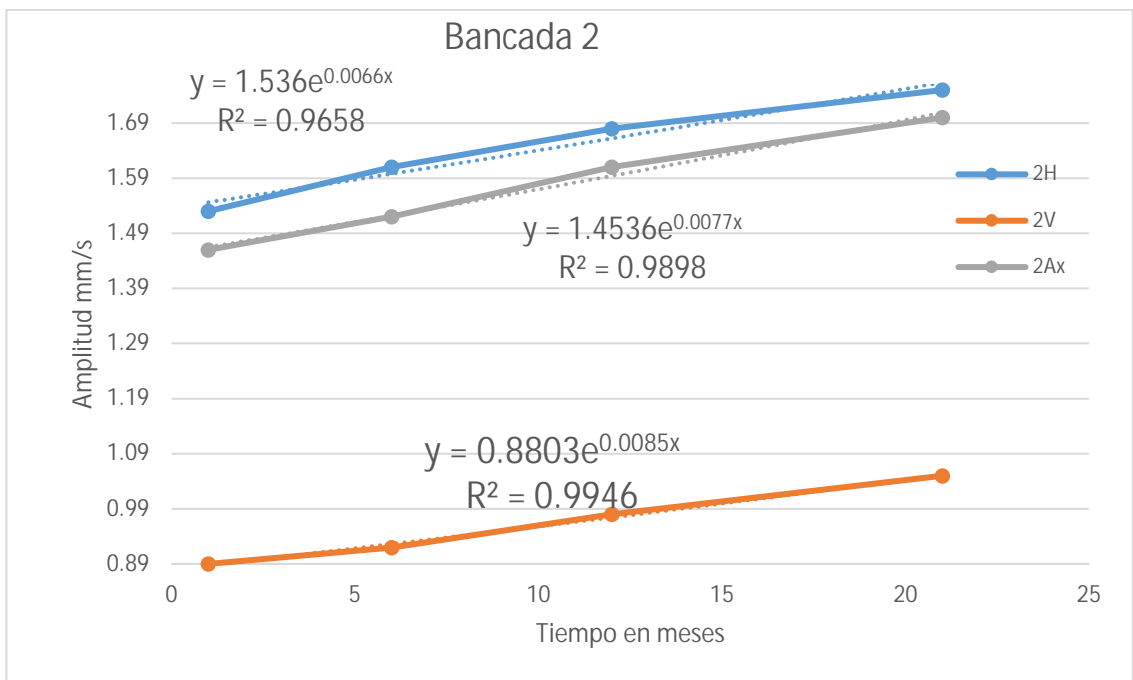
Como se aprecia en la gráfica 12, existe un cambio considerable desde, la considerada por los autores para el estudio como la toma 2 correspondiente al mes 6, y la toma 3 del mes 12, esta diferencia es la que produce la curva de tendencia más pronunciada que todas las demás posiciones, siendo la que más se le acerca la posición Ax de la bancada 4, de esto se puede inferir que, las partes extremas de la maquina ya sea por refinador o por el motor presentan los mayores movimientos por vibración, teniendo en cuenta que la máquina tiene un reciente mantenimiento.

De manera contraria la bancada más centrada se puede notar que su comportamiento es menos variado a través del tiempo, esto infiriendo que estas bancadas están menos alejadas del motor el cual, mientras este en buenas condiciones de trabajo, sus velocidades de vibración serán menos que en las partes extremas. Sin embargo, es de notar que estas bancadas centrales son las que obtienen toda la potencia de dicho motor.

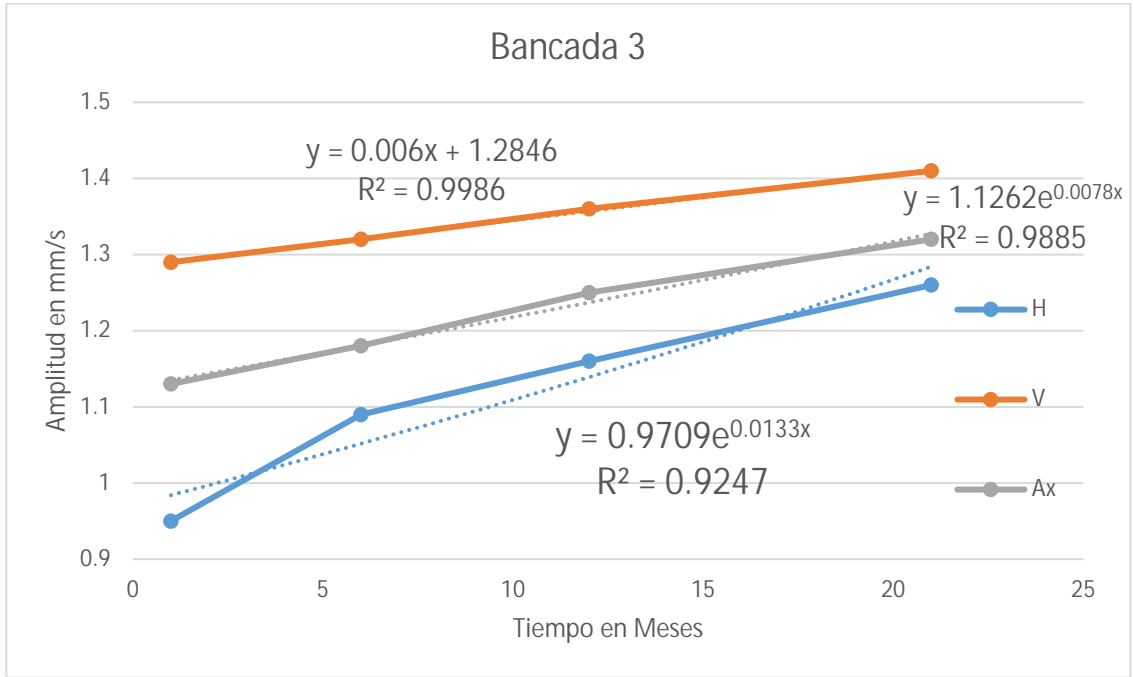
A continuación, se presentan las gráficas completas del estudio:



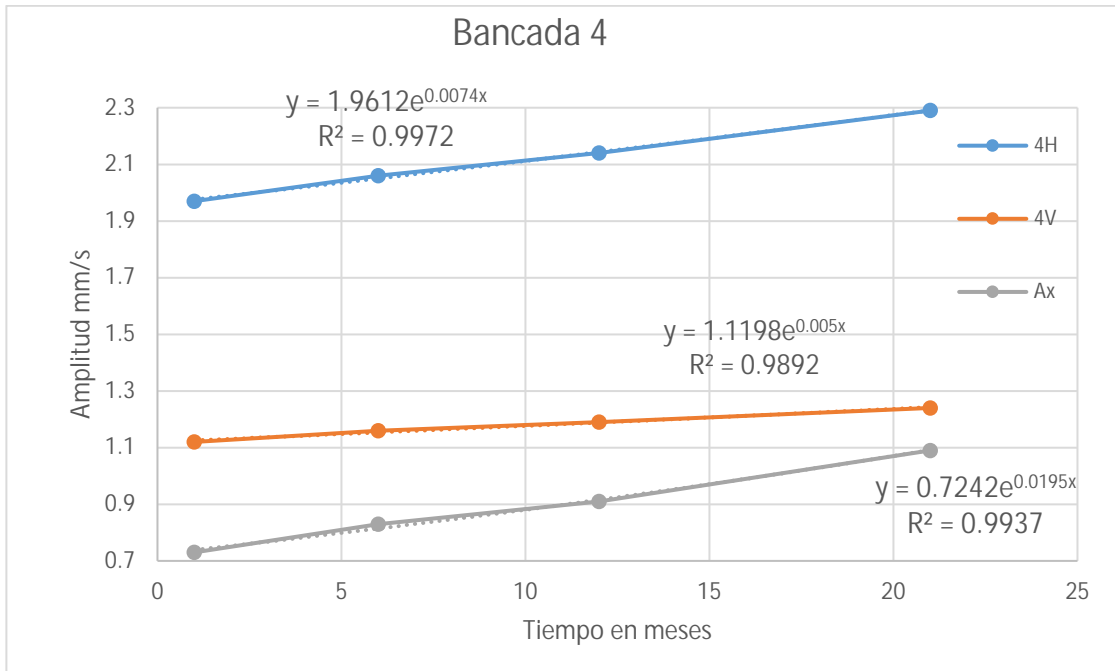
Gráfica 13. Cuervas de tendencias Bancada 1.



Gráfica 14. Cuervas de tendencias Bancada 2.



Gráfica 15. Cuervas de tendencias Bancada 3.



Gráfica 16. Cuervas de tendencias Bancada 4.

4.5 Proponer las acciones correctivas según el tipo de modo de falla de acuerdo a los parámetros exigidos por el fabricante del equipo, establecidas en las Normas.

Con base a los datos, resultados y el pronóstico obtenidos para una posición Ax (axial) se proponen seguimientos de alineación, ya que, esta es la modalidad de falla presentada para este tipo de situación. Además, se propone al momento del seguimiento de la maquina tomar en cuenta factores como el ajuste en bases, el nivel de vibración a simple vista y el estado de las correderas, dando a entender que, estos factores son influyentes indirectos de desalineación en esta posición.

Así mismo, es importante resaltar que, con los datos obtenidos no es posible determinar que el siguiente modo de falla en la máquina será por desalineación, considerando que, principalmente que la posición Ax (axial) en las bancadas 1 y 4 fueron las más propensas a falla en los próximos 7 años aproximadamente, una aceleración envolvente en la bancada 1 también se presentó propensa a falla, está aún más que la bancada 4. Por ello se proponen acciones de seguimientos a los rodamientos y mantenimiento preventivo para su correcto funcionamiento.

Sin embargo, no debe obviarse que los resultados obtenidos no son determinantes de una falla específica, esto debido a que se presentó un pronóstico estimado a la falla de la máquina, adicionalmente sabiendo que, los datos recabados son parte de la fase temprana posterior al mantenimiento correctivo de la máquina, por lo cual, la curva de tendencia en la que se basa el pronóstico, termina siendo conservadora como fue presentada y dos o más tomas datos pueden cambiar el movimiento de la curva de tendencia exponencial, dando como resultado un pronóstico menos conservador.

Por esta razón se proponen acciones correctivas como fricción en los rodamientos, para ellos es importante el ambiente de trabajo de la máquina, seguimientos al desgaste de los discos evitando el desbalanceo y ajustes de sujeciones para evitar los modos de falla conocidos, mediante el pronóstico presentado y experiencia de los expertos, los cuales son; balanceo dinámico (pronosticado por los expertos), alineaciones o cambios de rodamientos, estos últimos dos estimados y predichos por los resultados obtenidos y expuestos.

CONCLUSIONES

Tras un profundo análisis del objetivo general y los objetivos específicos previamente enunciados y sustentados posteriormente en el marco teórico, se procede a resaltar y resumir lo siguiente:

Hay que destacar en el ámbito de las técnicas de análisis de fallas usadas en el método de Mantenimiento Predictivo Basado en la Confiabilidad (MPBC), se pueden encontrar una gran variedad de métodos para dicho análisis. Sin embargo, en lo que respecta a análisis no destructivos, a pesar de que igualmente se encuentra variedad de métodos, los más comunes son: mediante ultrasonido, líquidos penetrantes, análisis de aceites, y cámara termo-gráfica y mediante análisis de vibraciones, este último, el utilizado para desarrollar el proyecto presentado.

Se concluye que, para determinar el modo de falla de una máquina, mediante el método nombrado en el párrafo anterior, es importante saber qué tipo de máquina se presenta según su ficha técnica, para así catalogarla según la norma correspondiente para este tipo de estudios la cual es la **ISO 10816-1**, para así, ubicarla mediante el análisis de vibraciones, junto a los datos obtenidos comparados con las tablas de diagnóstico 2.2.8 para tener

en claro que elementos o que posibles fallas pueda presentar de los datos obtenidos.

Con respecto a los parámetros de funcionamiento de la compañía, los resultados arrojados en el presente trabajo de investigación dan a entender que dicha compañía no establece un criterio específico para el funcionamiento de la máquina, sino que, hacen mantenimiento cuando la maquina lo requiere mediante seguimientos. En este mismo orden de ideas se puede concluir que, cuando se presenten situaciones similares, los parámetros de funcionamientos requeridos que se tomarán en cuenta por los investigadores serán los permitidos por la norma especificadas en el párrafo anterior y en toda la extensión del contenido, como se puede constatar que se aplicó en el presente proyecto de investigación.

Así mismo, se pudo constatar que, el método utilizado en el proyecto presentado puede extrapolarse a todo tipo de máquinas en el contexto del área industrial como el comercial y doméstico, como se dio a entender en el marco teórico, las normas ISO 10816-1 y el criterio de severidad para aceleración envolvente son aplicadas de manera general a todo tipo de máquinas, previamente clasificadas.

Se pudo determinar mediante el método y el informe del análisis realizado en el cual se basa la investigación presente, que el refinador primario de la empresa Papeles Venezolanos C.A (PAVECA) tendrá un tiempo de trabajo estimado de 3 años sin salir de la norma establecida.

RECOMENDACIONES

A continuación, se dictan una serie de recomendaciones cuya implementación es significativas en caso de investigadores que deseen implementar un análisis de resultados ya sea del refinador primario tratado en el presente trabajo de investigación, del estudio de una maquina similar sea para la extensión del tópico del presente proyecto o el escrutinio de cualquiera de los temas involucrados:

En primer lugar, es recomendable para estudios similares al presentado o en función de profundizar temas considerados en el mismo, tener una cantidad de datos mayor, de modo que, en el caso del tema en cuestión la curva para la predicción forme parte de dicha curva más que en una fase temprana o fase tardía en su totalidad, lo que infiere una mayor precisión y menor estimación en la predicción.

Además, un registro histórico para constatar una rata de fallas las cuales puedan dar pie a una serie de estudios para la predicción del estado de la maquina más detallado respecto al tiempo de producción.

Para estudios de la presente índole se recomienda recabar la mayor cantidad de datos posibles los cuales atraviesen distintas fases de la curva que se

quiera proyectar o predecir en función de la temporalidad en la que se obtienen dichos datos.

Es importante tener estudios de otros métodos de confiabilidad, en el caso del proyecto en cuestión, con el fin de comparar y analizar las diferencias entre los distintos métodos sus precisiones y confiabilidades.

Se aconseja, dentro de lo posible, recolectar en el caso de los datos, los reportes que indiquen los factores influyentes en cada dato significativo, obteniendo así, la mayor cantidad de causas de movimientos distintivos en la gráfica y así poder tener una consideración al tomar en cuenta dichos picos justificados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Acuña, M. B. (2006). **Como se elabora un proyecto de investigación**. Caracas: BL Consultores Asociados. Servicio Editorial.

Albarado Duván (2017) **Elaboración de un plan de mantenimiento preventivo de los equipos críticos de las principales subestaciones de la empresa de energía de Boyacá s.a. e.s.p. aplicado por la empresa asistencia técnica industrial** ltda. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

Alderete, V., Colombo, A., Di Stéfano, V., & Wade, P. (2003). Six Sigma. Congreso del Instituto Argentino de Profesores Universitarios de Costos, (págs. 2-21). La Plata.

Álvarez, E. (20 de febrero de 2016). “**PROBLEMÁTICA DE LAS MEDICIONES DE**”. Obtenido de Universidad Austral de Chi: <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2006/bmfcia473p/doc/bmfcia473p.pdf>

Arias, F. G (2012). **El Proyecto de Investigación** (6ta Edición). Caracas. Editorial

Balestrini, M (2006). **Como se elabora el proyecto de investigación**. (7ª. Ed.)
Caracas, Venezuela

CHUTE R, John. A framework for maintenance effectiveness (en línea): United State:
Reability, 2006. Disponible en internet:
http://www.reliabilityweb.com/art04/right_things.htm

Datos". Obtenido de Guemisa:

Dumas, Jackie . (1993). **Mantenimiento predictivo por análisis de vibraciones. Las nuevas tecnologías para el tratamiento de la señal**. Barcelona:
TecnicaAcusticaValladolid.Episteme e_interpretaci%C3%B3n_de_datos.

Estévez E. (2015). **Mantenimiento Industrial**

Flores, Henrique (2020). **Evaluación mediante vibraciones de los rodamientos de la transmisión de un prototipo mini Baja SAE**. Trabajo de Investigación..
Universidad de Carabobo

González, J (2015), **“Propuesta de Mantenimiento Preventivo y Planificado para la Línea de Producción en la Empresa Latercer S.A.C”** Tesis de grado.
Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo, Peru.

Gutiérrez, D., & Serna, E. (20 de octubre de 2014). **“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MONITOREO DE”**. Obtenido de UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA:
<http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/5624/621317G984.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Hidalgo, N. (28 de octubre de 2014). **“DISEÑO DE UN SISTEMA DE OPERACIONES Y”**. Obtenido de UNIVERSIDAD DE GUAYAQUIL:
<http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/3957/1/Dise%C3%B1o%20de%20un%20sistema%20de%20operaciones%20y%20de%20mantenimiento%20de%20un%20prototipo%20de%20baja%20sae.pdf>

Ode%20Un%20Sistema%20de%20Operaciones%20y%20Mantenimie105
nto%20Para%20Maquinarias%20y%20Equipos%20Para%20Borsea%20S.pdf

http://www.academia.edu/18707432/An%C3%A1lisis_de_vibraciones_

Lopez, E. (17 de julio de 2016). “**El Mantenimiento Productivo Total Tpm**”.

Obtenido de Bogotá:

<https://www.javeriana.edu.co/biblos/tesis/ingenieria/Tesis262.pdf>

MURILLO, William. Implementación del mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) en planta de alimentos. Julio 2010.

Nivelo, S., & Romero, D. (27 de Diciembre de 2014). “**diagnóstico de maquinaria por vibraciones**”. Obtenido de Preditecnio-Universidad Politécnica Salesiana de Cuenca: 107 <http://www.preditecnico.com/2014/12/la-universidad-politecnicasalesiana-de.html>.

Olarte & Botero. (2015). “**TÉCNICAS DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO UTILIZADAS EN LA INDUSTRIA**”. Pereira: Scientia et Technica Año XVI, No 45.

Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación (FAO). 1995. Pulp and Paper Capacities, Survey 1994-1999. Roma: FAO.

Organización Internacional del trabajo (OIT). 1992

. Ginebra: OIT.

Parra, J. (10 de noviembre de 2016). “**Caracterización de síntomas vibratorios producidos por fallas**”. Obtenido de Universidad de Concepción: http://repositorio.udec.cl/bitstream/handle/11594/2172/Tesis_Caracterizacion_de_sintomas.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Sabino, Carlos (2007). “**El proceso de investigación**”. México. Editorial Limusa.

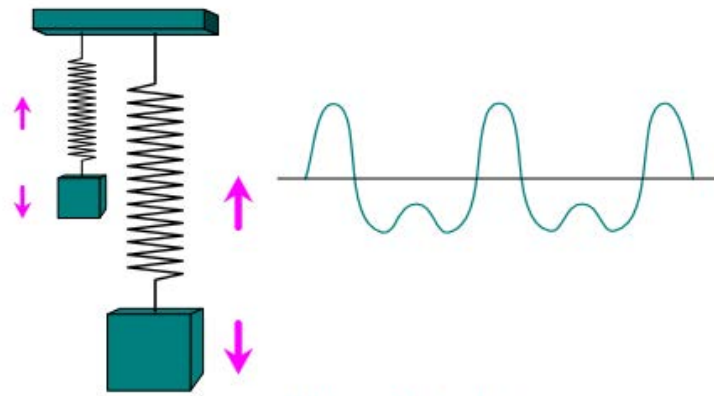
Sampieri R. (2006). Metodología de la Investigación (3ed.) México: Mc Graw Hill.

- Sánchez, A. M. (2 de febrero de 2017). “**TÉCNICAS DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO. METODOLOGIA DE APLICACIÓN EN LAS ORGANIZACIONES**”. Obtenido de universidad católica de Colombia: <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/15585/1/T%C3%89CNICAS%20DE%20MANTENIMIENTO%20PREDICTIVO.%20METODOLOGIA%20DE%20APLICACI%C3%93N%20EN%20LAS%20ORGANIZACIONES.pdf>
- Solar, G. L. (2014). “**Análisis de vibraciones para el mantenimiento predictivo. Técnica Industrial 255**”.
- Súnico, M. R. (2015). “**ANÁLISIS MODAL OPERACIONAL: TEORÍA Y PRÁCTICA**”. Sevilla: ESCUELA SUPERIOR DE INGENIEROS - Camino de los Descubrimientos.
- Tamayo, M y Tamayo (2001). **El proceso de la investigación científica** (4ed.) México: Limusa.
- Torres, F. (17 de 12 de 2018). “**Análisis de vibraciones e interpretación de** Universidad Pedagógica Experimental Libertador (UPEL) (2016). “**Manual de Trabajo de Grado de Especialización Maestría y Tesis Doctorales**” Caracas.
- Villegas, J. (03 de junio de 2016). “**PROPUESTA DE MEJORA EN LA GESTIÓN DEL ÁREA DE**”. Obtenido de FACULTAD DE INGENIERÍA Y COMPUTACIÓN: file:///C:/Users/Usuario/Downloads/VILLEGAS_ARENAS_JUA_OPT.pdf
- White, G. (1990-2010). **Introducción al análisis de vibraciones**. Miami: Azima DLI.
- William OlarteC., M. B. (2010). **Técnicas de mantenimiento predictivo utilizadas en la industria**. Universidad Tecnológica de Pereira

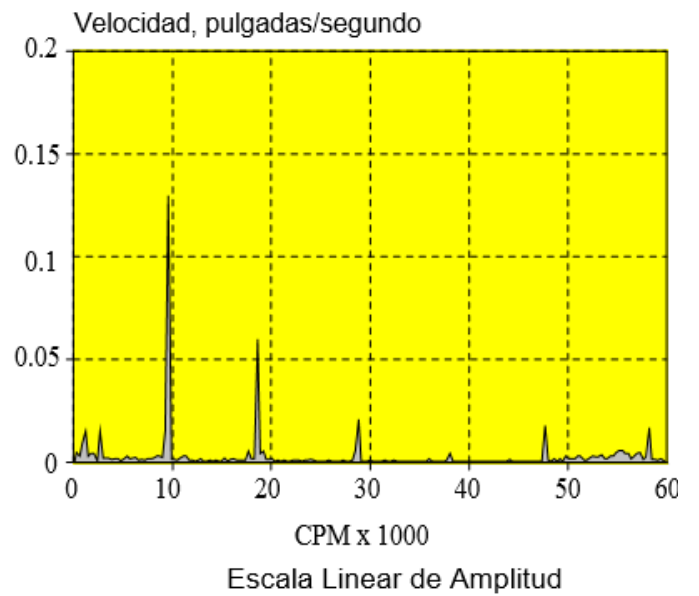
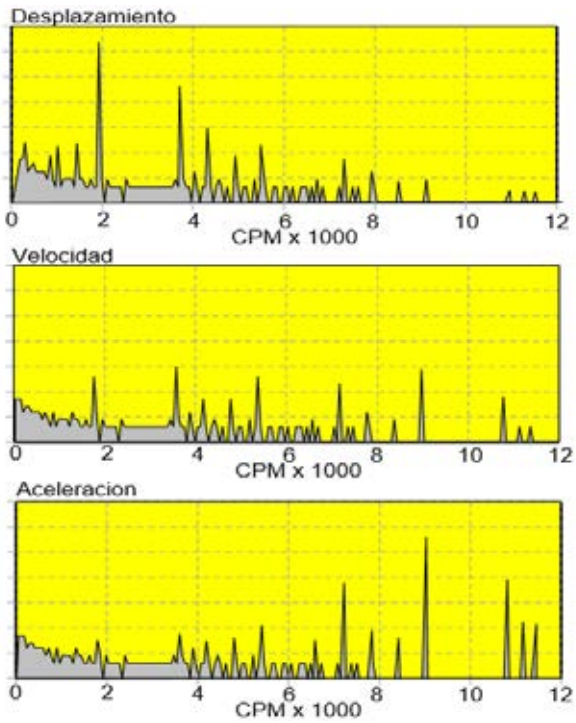
Yépez, H. (2016) **“Rediseño del plan de mantenimiento preventivo de una línea de envasado de la empresa C.A Venezolana de pinturas”** Tesis de Grado.
Universidad José Antonio Páez.

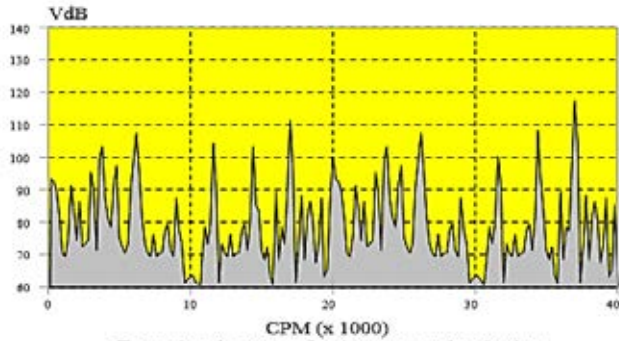
ANEXOS

ANEXOS A

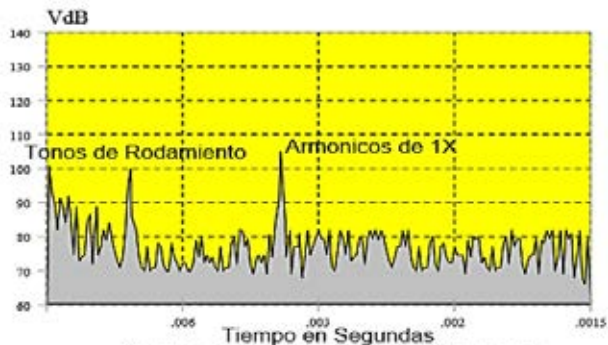


Vibracion Compleja

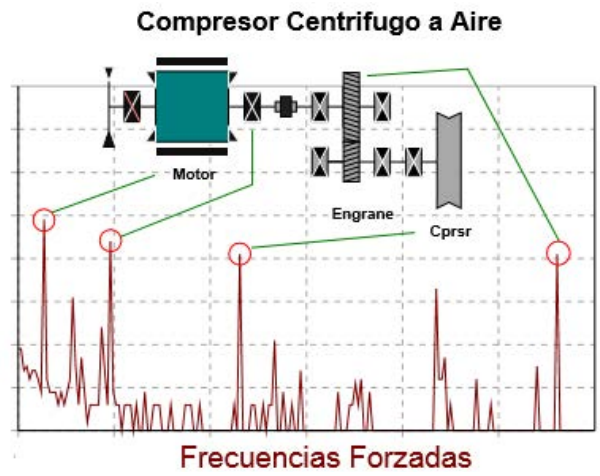




Espectro de una máquina con rodamientos



Cepstro de una máquina con rodamientos



ANEXOS B

Video de Muestra del refinador primario



<https://www.youtube.com/watch?v=B4E4RVUsHCU>

ANEXOS C

Análisis de vibraciones al refinador primario



<https://www.youtube.com/watch?v=LxGf8HDdPT4>



UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
 COORDINACIÓN DE PASANTÍAS Y TRABAJO DE GRADO
 FACULTAD DE INGENIERÍA

ACTA DE APROBACIÓN DEL INFORME DE PASANTÍA O
 TRABAJO DE GRADO

El jurado designado por la Facultad de Ingeniería para la evaluación del Informe Final de Pasantía o Trabajo de Grado titulado:

ANÁLISIS DE VIBRACIONES MECÁNICAS DEL REFINADOR
 PRIMARIO EN LA PLANTA DE PULPA DE PAPIEROS VENEZOLANOS
 C.A. MEDIANTE EL MÉTODO DE MONITOREO PREDICTIVO
 BASADO EN LA CONFIABILIDAD (MPCBI)

Realizado por el (la) Br. ROMÁN JOSÉ
 C.I. N° 25.110.303, cursante de la carrera de Ingeniería MECÁNICA hace constar
 después de analizar su contenido y oír la exposición oral, considera que reúne los méritos suficientes
 para su aprobación asignándole la CALIFICACION DEFINITIVA D^o VEINTE 20 PUNTOS

El Jurado



[Signature]
Tutor académico (coordinador)
 Nombre: L. ORTEGA
 C.I. 3476801

[Signature]
Jurado (1)
 Nombre: Tomás González
 C.I. 18.861.190

[Signature]
Jurado (2)
 Nombre: Donato Romanello Fecha: 6/9/21
 C.I. 4131897

PARA SER LLENADO POR LA COORDINACIÓN DE PASANTÍA Y TRABAJO DE GRADO

<p>He recibido Original del Acta de Aprobación para ser colocada en la solvencia Académica</p> <p>Nombre del Graduando: _____</p> <p>C. I. _____</p> <p>Fecha: _____</p>	<p><u>[Signature]</u> Coordinación de Pasantía y Trabajo de Grado</p> <p>SEMESTRE: <u>2021 - 1CV</u></p>
--	---



UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
 COORDINACIÓN DE PASANTÍAS Y TRABAJO DE GRADO
 FACULTAD DE INGENIERÍA

ACTA DE APROBACIÓN DEL INFORME DE PASANTÍA O
 TRABAJO DE GRADO


El jurado designado por la Facultad de Ingeniería para la evaluación del Informe Final de Pasantía o Trabajo de Grado titulado:

ANÁLISIS DE VIBRACIONES MECÁNICAS DEL REFINADOR PRIMARIO EN LA PLANTA DE PULPA DE PAPELOS VENEZOLANOS C.A MEDIANTE EL MÉTODO DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO BASADO EN LA CONTINGENCIA (HPBC)

Realizado por el (la) Br. SALCEDO CRISTÓBAL,
 C.I. N° 21.077.200, cursante de la carrera de Ingeniería MECÁNICA hace constar después de analizar su contenido y oír la exposición oral, considera que reúne los méritos suficientes para su aprobación asignándole la CALIFICACION DEFINITIVA D^{ES} BUENA 20 PUNTOS


El Jurado


 Tutor académico (coordinador)
 Nombre: L. CRIEGA
 C.I. 3476501


 Jurado (1)
 Nombre: Tomás González
 C.I. 18.361.193


 Jurado (2)
 Nombre: Donato Romarelli Fecha: 6/9/21
 C.I. 4131977

PARA SER LLENADO POR LA COORDINACIÓN DE PASANTÍA Y TRABAJO DE GRADO

He recibido Original del Acta de Aprobación para ser colocada en la solvencia Académica	 Coordinación de Pasantía y Trabajo de Grado SEMESTRE: <u>2021-1er</u>
Nombre del Graduando: C. I. Fecha:	



UNIVERSIDAD JOSE ANTONIO PAEZ
 COORDINACION DE PASANTIAS Y TRABAJO DE GRADO
 FACULTAD DE INGENIERIA

ACTA DE APROBACION DEL INFORME DE PASANTIA O
 TRABAJO DE GRADO

El jurado designado por la Facultad de Ingeniería para la evaluación del Informe Final de Pasantía o Trabajo de Grado titulado:

ANÁLISIS DE VIBRACIONES MECÁNICAS DEL REFINADOR
PRIMARIO EN LA PLANTA DE PULPA DE PAPELUS VENEZOLANOS
C/A MEDIANTE EL MÉTODO DE MONTECARLO PREDICTIVO
BASADO EN LA CONFIABILIDAD (MBCI)

Realizado por el (la) Br. RONDÓN JOSÉ

C.I.N° 25.110.303, cursante de la carrera de Ingeniería MECÁNICA hace constar después de analizar su contenido y oída la exposición oral, considera que reúne los méritos suficientes para su aprobación asignándole la CALIFICACION DEFINITIVA D ^{En letras} VEINTE (20) PUNTOS

El Jurado

[Signature]
 Tutor académico (coordinador)

Nombre: L. ORTEGA
 C.I. 3476801


[Signature]
 Jurado (1)

Nombre: Tomás González
 C.I. 18.261.190

[Signature]
 Jurado (2)

Nombre: Donato Romanello Fecha: 6/9/21
 C.I. 4131877

PARA SER LLENADO POR LA COORDINACIÓN DE PASANTIA Y TRABAJO DE GRADO

<p>He recibido Original del Acta de Aprobación para ser colocada en la solvencia Académica</p> <p>Nombre del Graduando: _____</p> <p>C. I. _____</p> <p>Fecha: _____</p>	<p><u>[Signature]</u> Coordinación de Pasantía y Trabajo de Grado</p> <p>SEMESTRE: <u>2021 - 1CV</u></p> 
--	---



UNIVERSIDAD JOSE ANTONIO PAEZ
 COORDINACION DE PASANTIAS Y TRABAJO DE GRADO
 FACULTAD DE INGENIERIA


ACTA DE APROBACION DEL INFORME DE PASANTIA O
 TRABAJO DE GRADO


El jurado designado por la Facultad de Ingeniería para la evaluación del Informe Final de Pasantía o Trabajo de Grado titulado:

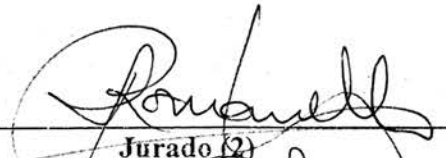
ANÁLISIS DE VIBRACIONES MECÁNICAS DEL REFINADOR
PRIMARIO EN LA PLANTA DE PULPA DE PAPELOS VENEZOLANOS
C.A MEDIANTE EL MÉTODO DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO
BASADO EN LA CONFIABILIDAD (MPBC)

Realizado por el (la) Br. SALCEDO CRISTÓBAL
 C.I N° 27.097.200, cursante de la carrera de Ingeniería MECANICA hace constar después de analizar su contenido y oír la exposición oral, considera que reúne los méritos suficientes para su aprobación asignándole la CALIFICACION DEFINITIVA D VEINTE (20) PUNTOS

El Jurado


 Tutor académico (coordinador)
 Nombre: L. ORTEGA
 C.I. 3476801


 Jurado (1)
 Nombre: Tomás González
 C. I. 18.861.190

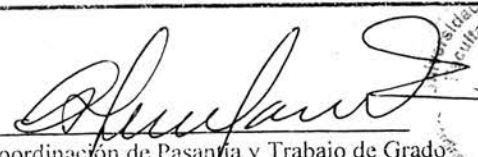

 Jurado (2)
 Nombre: Donato Romanello
 C. I. 4131277

Fecha: 6/9/21

PARA SER LLENADO POR LA COORDINACIÓN DE PASANTIA Y TRABAJO DE GRADO

He recibido Original del Acta de Aprobación para ser colocada en la solvencia Académica

Nombre del Graduando:
 C. I.
 Fecha:


 Coordinación de Pasantía y Trabajo de Grado

SEMESTRE: 2021-1er

