



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE MECÁNICA ESCUELA DE INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO

**“DESARROLLO DE ESTÁNDARES DE TOLERANCIA DE
DESALINEAMIENTO Y SU CONSUMO ENERGÉTICO DE
MOTORES ELÉCTRICOS EN EL LABORATORIO DE
ANÁLISIS VIBRACIONAL DE LA ESCUELA DE
INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO”**

**LAGLA TAIPE BYRON RUBÉN
LANCHE PINEDAPABLO ARTURO**

TESIS DE GRADO

Previa a la obtención del Título de:

INGENIERO DE MANTENIMIENTO

**RIOBAMBA – ECUADOR
2016**

CERTIFICADO DE APROBACIÓN DE TESIS

2013-04-18

Yo recomiendo que la Tesis preparada por:

LAGLA TAIBE BYRON RUBÉN
LANCHE PINEDA PABLO ARTURO

Titulada:

“DESARROLLO DE ESTÁNDARES DE TOLERANCIA DE
DESALINEAMIENTO Y SU CONSUMO ENERGÉTICO DE MOTORES
ELÉCTRICOS EN EL LABORATORIO DE ANÁLISIS VIBRACIONAL DE LA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO”

Sea aceptada como parcial complementación de los requerimientos para el Título de:

INGENIERO DE MANTENIMIENTO

Ing. Geovanny Novillo Andrade
DECANO FACULTAD DE MECÁNICA

Nosotros coincidimos con esta recomendación:

Ing. Eduardo HernándezDávila
DIRECTOR DE TESIS

Ing. Marco Almendariz Puente
ASESOR DE TESIS

CERTIFICADO DE EXAMINACIÓN DE TESIS

NOMBRE DEL ESTUDIANTE:LANCHE PINEDA PABLO ARTURO

TÍTULO DE LA TESIS:“DESARROLLO DE ESTÁNDARES DE TOLERANCIA DE DESALINEAMIENTO Y SU CONSUMO ENERGÉTICO DE MOTORES ELÉCTRICOS EN EL LABORATORIO DE ANÁLISIS VIBRACIONAL DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO”

Fecha de Exanimación: 2015-05-20

RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:

| COMITÉ DE EXAMINACIÓN | APRUEBA | NO APRUEBA | FIRMA |
|--|----------------|-------------------|--------------|
| Ing. FernandoGonzález Puente PRESIDENTE TRIB. DE DEFENSA | | | |
| Ing. Eduardo HernándezDávila DIRECTOR | | | |
| Ing. Marco Almendariz Puente ASESOR | | | |

* Más que un voto de no aprobación es razón suficiente para la falla total.

RECOMENDACIONES: _____

El Presidente del Tribunal certifica que las condiciones de la defensa se han cumplido.

Ing. Fernando Gonzales Puente
PRESIDENTE TRIB. DE DEFENSA

CERTIFICADO DE EXAMINACIÓN DE TESIS

NOMBRE DEL ESTUDIANTE:LAGLA TAPE BYRON RUBÉN

TÍTULO DE LA TESIS:“DESARROLLO DE ESTÁNDARES DE TOLERANCIA DE DESALINEAMIENTO Y SU CONSUMO ENERGÉTICO DE MOTORES ELÉCTRICOS EN EL LABORATORIO DE ANÁLISIS VIBRACIONAL DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO”

Fecha de Examinación:2015-05-20

RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:

| COMITÉ DE EXAMINACIÓN | APRUEBA | NO APRUEBA | FIRMA |
|---|----------------|-------------------|--------------|
| Ing. FernandoGonzález Puente PRESIDENTE TRIB. DEFENSA | | | |
| Ing. Eduardo Hernández Dávila DIRECTOR | | | |
| Ing. Marco Almendariz Puente ASESOR | | | |

* Más que un voto de no aprobación es razón suficiente para la falla total.

RECOMENDACIONES: _____

El Presidente del Tribunal certifica que las condiciones de la defensa se han cumplido.

Ing. Fernando Gonzales Puente
PRESIDENTE TRIB. DE DEFENSA

DERECHOS DE AUTORÍA

El trabajo de Tesis que presentamos, es original y basado en el proceso de investigación y adaptación tecnológica establecido en la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. En tal virtud, los fundamentos teórico-científicos y los resultados son de exclusiva responsabilidad de los autores. El patrimonio intelectual le pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Pablo Arturo Lanche Pineda

Byron Rubén Lagla Taipe

DECLARACION DE AUTENTICIDAD

Nosotros, Pablo Arturo Lanche Pineda y Byron Rubén Lagla Taipe, declaramos que el presente trabajo de Tesis es de nuestra autoría y que los resultados del mismo son auténticos y originales. Los textos constantes en el documento que provienen de otra fuente están debidamente citados y referenciados.

Como autores, asumimos la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación.

Pablo Arturo Lanche Pineda

Cédula de identidad:1718795319

Byron Rubén Lagla Taipe

Cédula de identidad: 0503066581

DEDICATORIA

Este trabajo va dedicado a mí madre y hermanos que han sido el pilar fundamental para poder alcanzar esta meta tan anhelada.

A mi esposa e hija que han sido la inspiración necesaria e indispensable para seguir adelante a pesar de las adversidades que se han presentado en la vida estudiantil.

Pablo Arturo Lanche Pineda

En la vida tenemos etapas que iniciar y culminar, rodeados de personas y amigos que motivan a seguir adelante, un agradecimiento a mi Dios ya que ha sido mi amigo principal, quien me ha acompañado y guiado en la culminación de esta etapa y que me ha mantenido bajo su gracia.

A mis padres y al amor familiar que nos une, por su esfuerzo, sacrificio, confianza y disciplina que me mantuvieron firme en el recorrido de mi vida y poder llegar hasta aquí, ha sido un privilegio ser su hijo, a mi hermana que es un ejemplo de lucha y dedicación.

A mis amigos los cuales me ayudaron en tiempos difíciles, y hemos compartido experiencias, vivencias, sueños y aspiraciones, construyendo una amistad sincera.

Byron Rubén Lagla Taipe

AGRADECIMIENTO

El más sincero agradecimiento a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, en especial a la Escuela de Ingeniería de Mantenimiento, por brindarnos la oportunidad de obtener una profesión de calidad.

A Dios por la fortaleza, salud y sus bendiciones, agradezco a mi madre Mariana Pineda por el esfuerzo que hacen día tras día para brindarme su apoyo incondicional.

A mi esposa Hilda Armijos que siempre me ha dado todo su apoyo y confianza para poder dar un paso más en mi carrera, y a toda mi familia que siempre han estado pendiente para darme el aliento y seguir adelante.

Pablo Arturo Lanche Pineda

Agradezco a Dios por permitirme llegar a mi meta, guiándome y alimentando mi alma de sabiduría y conocimiento.

A la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo en especial a nuestra prestigiosa Escuela de Ingeniería de Mantenimiento por acogerme en sus aulas, en especial a todos los profesores que impartieron sus conocimientos y formarme como profesional

Así también extender mi agradecimiento y gratitud al Ing. Eduardo Hernández y al Ing. Marco Almendariz ya que con su entusiasmo y colaboración permiten la culminación de la presente tesis.

Byron Rubén Lagla Taipe

CONTENIDO

Pág.

| | | |
|----------|---|----|
| 1 | INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS | |
| 1.1 | Antecedentes | 1 |
| 1.2 | Justificación..... | 1 |
| 1.3 | Objetivos | 2 |
| 1.3.1 | <i>Objetivo general.</i> | 2 |
| 1.3.2 | <i>Objetivos específicos:</i> | 2 |
| 2 | MARCO TEÓRICO | |
| 2.1 | Vibración | 3 |
| 2.2 | Tipos de vibración | 3 |
| 2.2.1 | <i>Vibración libre</i> | 3 |
| 2.2.2 | <i>Vibración forzada.</i> | 3 |
| 2.2.3 | <i>Frecuencia natural.</i> | 3 |
| 2.2.4 | <i>Vibración simple</i> | 5 |
| 2.2.5 | <i>Vibración compleja</i> | 5 |
| 2.3 | Elementos de una onda..... | 6 |
| 2.3.1 | <i>Amplitud.</i> | 6 |
| 2.3.2 | <i>Fase.</i> | 6 |
| 2.3.3 | <i>Periodo.</i> | 6 |
| 2.3.4 | <i>Frecuencia.</i> | 7 |
| 2.4 | Magnitudes de vibración..... | 7 |
| 2.5 | Normas de Vibraciones | 7 |
| 2.5.1 | <i>Norma ISO 10816-1:1995.</i> | 8 |
| 2.6 | Ubicación de los puntos de prueba | 8 |
| 2.7 | Equipo de medición de la vibración VIBRAcheck AVG-200..... | 9 |
| 2.7.1 | <i>Características principales del equipo VIBRAcheck AVG-200.</i> | 9 |
| 2.7.2 | <i>Trabaja en conjunto con el software MAINTraQ predictive.</i> | 10 |
| 2.8 | Desalineación..... | 11 |
| 2.8.1 | <i>Tipos de desalineación.</i> | 11 |
| 2.8.1.1 | <i>Desalineación paralela</i> | 11 |
| 2.8.1.2 | <i>Desalineación angular</i> | 11 |
| 2.8.1.3 | <i>Desalineación combinada</i> | 11 |
| 2.8.2 | <i>Análisis de la desalineación mediante vibraciones.</i> | 11 |
| 2.8.2.1 | <i>Desalineación paralela.</i> | 11 |
| 2.8.2.2 | <i>Desalineación angular.</i> | 12 |
| 2.8.2.3 | <i>Desalineación combinada</i> | 12 |
| 2.8.3 | <i>Tolerancias de desalineación.</i> | 12 |
| 2.9 | Alineación..... | 13 |
| 2.9.1 | <i>Sistema de alineación con reloj y carátula.</i> | 13 |
| 2.9.2 | <i>Sistema de alineamiento láser.</i> | 13 |
| 2.10 | Acoplamiento | 14 |
| 2.10.1 | <i>Tipos de acoplamientos.</i> | 14 |
| 2.10.1.1 | <i>Acoplamientos</i> | 14 |
| 2.10.1.2 | <i>Acoplamientos flexibles</i> | 14 |
| 2.11 | Modelo de regresión lineal | 15 |
| 2.11.1 | <i>Métodos de mínimos cuadrados.</i> | 15 |

| | | |
|----------|--|----|
| 3 | ESTADO DEL BANCO DE PRUEBA DE DESALINEACIÓN EXISTENTE EN EL LABORATORIO DE ANÁLISIS VIBRACIONAL | |
| 3.1 | Ubicación del equipo | 16 |
| 3.1.1 | <i>Ubicación geográfica y climatológica.</i> | 16 |
| 3.1.2 | <i>Ubicación en el laboratorio.</i> | 16 |
| 3.2 | Elementos que conforman el banco de pruebas de desalineación | 17 |
| 3.2.1 | <i>Estructura del banco de pruebas de desalineación.</i> | 17 |
| 3.2.2 | <i>Motor del banco de pruebas.</i> | 17 |
| 3.2.3 | <i>Mecanismo de desalineación.</i> | 18 |
| 3.2.4 | <i>Eje conducido.</i> | 18 |
| 3.2.5 | <i>Acople.</i> | 19 |
| 3.2.6 | <i>Chumaceras.</i> | 19 |
| 3.3 | Evaluación inicial del banco de pruebas | 20 |
| 3.4 | Modificación del banco de desalineación | 21 |
| 3.4.1 | <i>Mecanismo de desalineación.</i> | 21 |
| 3.4.2 | <i>Mesa del banco de pruebas.</i> | 23 |
| 4 | MONTAJE, CALIBRACION Y OBTENCION DE DATOS. | |
| 4.1 | Equipos de medición | 24 |
| 4.1.1 | <i>Equipo de alineación láser</i> | 24 |
| 4.1.2 | <i>Equipo de medición de vibraciones.</i> | 25 |
| 4.1.3 | <i>DT-2234C Digital Foto Tacómetro.</i> | 25 |
| 4.1.4 | <i>Pinza amperimétrica.</i> | 26 |
| 4.2 | Preparación del banco de pruebas | 26 |
| 4.2.1 | <i>Puntos de medición.</i> | 27 |
| 4.2.2 | <i>Rangos de frecuencia y velocidad.</i> | 27 |
| 4.3 | Desarrollo de rutas | 28 |
| 4.3.1 | <i>Creación de carpetas.</i> | 28 |
| 4.3.2 | <i>Creación de rutas en las carpetas.</i> | 28 |
| 4.4 | Desalineación paralela | 29 |
| 4.4.1 | <i>Desalineación paralela a 600, 1000, 1400 y 1800 rpm.</i> | 29 |
| 4.5 | Desalineación angular | 29 |
| 4.5.1 | <i>Desalineación angular a 600, 1000, 1400 y 1800 rpm.</i> | 29 |
| 4.6 | Toma de medidas de la corriente | 30 |
| 4.6.1 | <i>Consumo energético paralelo a 600, 1000, 1400 y 1800 rpm.</i> | 30 |
| 5 | ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS | |
| 5.1 | Desalineación del motor a 600 rpm | 32 |
| 5.1.1 | <i>Desalineación paralela.</i> | 32 |
| 5.1.1.1 | <i>Gráfica de evolución de espectros</i> | 32 |
| 5.1.1.2 | <i>Gráfica de tendencia de espectros.</i> | 33 |
| 5.1.1.3 | <i>Tabla de desalineación vs vibración.</i> | 34 |
| 5.1.1.4 | <i>Regresión lineal</i> | 35 |
| 5.1.1.5 | <i>Tolerancia de desalineación.</i> | 37 |
| 5.1.1.6 | <i>Consumo energético</i> | 38 |
| 5.1.2 | <i>Desalineación angular.</i> | 39 |
| 5.1.2.1 | <i>Gráfica de evolución de espectros</i> | 39 |
| 5.1.2.2 | <i>Gráfica de tendencia de espectros</i> | 40 |
| 5.1.2.3 | <i>Tabla de desalineación vs vibración.</i> | 40 |
| 5.1.2.4 | <i>Regresión lineal</i> | 41 |
| 5.1.2.5 | <i>Tolerancia de desalineación.</i> | 42 |
| 5.1.2.6 | <i>Consumo energético</i> | 43 |
| 5.2 | Desalineación del motor a 1000 rpm | 44 |
| 5.2.1 | <i>Desalineación paralela</i> | 44 |

| | | |
|----------|---|----|
| 5.2.1.1 | <i>Gráfica de evolución de espectros</i> | 44 |
| 5.2.1.2 | <i>Gráfica de tendencia de espectros</i> | 44 |
| 5.2.1.3 | <i>Tabla de desalineación vs vibración.</i> | 45 |
| 5.2.1.4 | <i>Regresión lineal</i> | 45 |
| 5.2.1.5 | <i>Tolerancia de desalineación</i> | 47 |
| 5.2.1.6 | <i>Consumo energético.</i> | 47 |
| 5.2.2 | <i>Desalineación angular</i> | 48 |
| 5.2.2.1 | <i>Gráfica de evolución de espectros punto MA</i> | 48 |
| 5.2.2.2 | <i>Gráfica de tendencia de espectros</i> | 48 |
| 5.2.2.3 | <i>Tabla de desalineación vs vibración.</i> | 49 |
| 5.2.2.4 | <i>Regresión lineal</i> | 50 |
| 5.2.2.5 | <i>Tolerancia de desalineación.</i> | 51 |
| 5.2.2.6 | <i>Consumo energético</i> | 51 |
| 5.3 | <i>Desalineación del motor a 1400 rpm</i> | 52 |
| 5.3.1 | <i>Desalineación paralela</i> | 52 |
| 5.3.1.1 | <i>Gráfica de evolución de espectros.</i> | 52 |
| 5.3.1.2 | <i>Gráfica de tendencia de espectros</i> | 53 |
| 5.3.1.3 | <i>Tabla de desalineación vs vibración</i> | 54 |
| 5.3.1.4 | <i>Regresión lineal</i> | 54 |
| 5.3.1.5 | <i>Tolerancia de desalineación</i> | 55 |
| 5.3.1.6 | <i>Consumo energético.</i> | 55 |
| 5.3.2 | <i>Desalineación angular</i> | 57 |
| 5.3.2.1 | <i>Gráfica de evolución de espectros</i> | 57 |
| 5.3.2.2 | <i>Gráfica de tendencia de espectros</i> | 57 |
| 5.3.2.3 | <i>Tabla de desalineación vs vibración.</i> | 58 |
| 5.3.2.4 | <i>Regresión lineal</i> | 59 |
| 5.3.2.5 | <i>Tolerancia de desalineación</i> | 60 |
| 5.3.2.6 | <i>Consumo energético</i> | 60 |
| 5.4 | <i>Desalineación del motor a 1800 rpm</i> | 61 |
| 5.4.1 | <i>Desalineación paralela</i> | 61 |
| 5.4.1.1 | <i>Gráfica de evolución de espectros.</i> | 61 |
| 5.4.1.2 | <i>Gráfica de tendencia de espectros</i> | 61 |
| 5.4.1.3 | <i>Tabla de desalineación vs vibración</i> | 62 |
| 5.4.1.4 | <i>Regresión lineal</i> | 63 |
| 5.4.1.5 | <i>Tolerancia de desalineación</i> | 64 |
| 5.4.1.6 | <i>Consumo energético</i> | 64 |
| 5.4.2 | <i>Desalineación angular</i> | 65 |
| 5.4.2.1 | <i>Gráfica de evolución de espectros.</i> | 66 |
| 5.4.2.2 | <i>Gráfica de tendencia de espectros</i> | 66 |
| 5.4.2.3 | <i>Tabla de desalineación vs vibración.</i> | 67 |
| 5.4.2.4 | <i>Regresión lineal</i> | 68 |
| 5.4.2.5 | <i>Tolerancia de desalineación.</i> | 69 |
| 5.4.2.6 | <i>Consumo energético.</i> | 69 |
| 5.5 | <i>Estándares de desalineación</i> | 70 |
| 5.6 | <i>Comparación de resultados.</i> | 70 |
| 6 | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | |
| 6.1 | <i>Conclusiones</i> | 71 |
| 6.2 | <i>Recomendaciones</i> | 72 |

BIBLIOGRAFÍA
ANEXOS

LISTA DE TABLAS

| | Pág. |
|----|------|
| 1 | 8 |
| 2 | 18 |
| 3 | 19 |
| 4 | 27 |
| 5 | 31 |
| 6 | 31 |
| 7 | 34 |
| 8 | 36 |
| 9 | 38 |
| 10 | 39 |
| 11 | 40 |
| 12 | 41 |
| 13 | 43 |
| 14 | 43 |
| 15 | 45 |
| 16 | 46 |
| 17 | 47 |
| 18 | 48 |
| 19 | 49 |
| 20 | 50 |
| 21 | 51 |
| 22 | 52 |
| 23 | 54 |
| 24 | 54 |
| 25 | 56 |
| 26 | 56 |
| 27 | 58 |
| 28 | 59 |
| 29 | 60 |
| 30 | 61 |
| 31 | 62 |
| 32 | 63 |
| 33 | 64 |
| 34 | 65 |
| 35 | 67 |
| 36 | 68 |
| 37 | 69 |
| 38 | 70 |
| 39 | 70 |

LISTA DE FIGURAS

| | Pág. |
|----|---|
| 1 | Vibración libre..... 3 |
| 2 | Vibración simple 5 |
| 3 | Vibración compleja 5 |
| 4 | Movimiento armónico simple 6 |
| 5 | Elementos de una onda..... 7 |
| 6 | Desplazamiento, velocidad y aceleración 7 |
| 7 | Medición dirección radial en chumaceras y rodamientos 9 |
| 8 | Medición dirección axial..... 9 |
| 9 | VIBRAcheck AVG -200.....10 |
| 10 | Tipos de desalineación11 |
| 11 | Desalineación paralela12 |
| 12 | Desalineación angular12 |
| 13 | Alineamiento de ejes en equipo rotativo13 |
| 14 | Equipo de alineación láser.....13 |
| 15 | Disposición general del laboratorio17 |
| 16 | Estructura del banco de pruebas de desalineación.....17 |
| 17 | Motor17 |
| 18 | Mecanismo de desalineación.....18 |
| 19 | Eje conducido18 |
| 20 | Acople flexible19 |
| 21 | Chumacera SKF P-208.....19 |
| 22 | Estado inicial del equipo de desalineación.....20 |
| 23 | Acople soporte-mesa de precisión paralela22 |
| 24 | Acople soporte-mesa de precisión angular22 |
| 25 | Sistema completo de desalineamiento22 |
| 26 | Mesa modificada y reforzada23 |
| 27 | Alienador láser Optalign Plus.....25 |
| 28 | VIBRAcheck AVG 20025 |
| 29 | DT-2234C Digital Foto Tacómetro.25 |
| 30 | Amperímetro.....26 |
| 31 | Preparación del banco de pruebas26 |
| 32 | Puntos de medición27 |
| 33 | Rutas de medición28 |
| 34 | Carpeta: Mediciones a 600 rpm28 |
| 35 | Desalineación29 |
| 36 | Amperímetro de pinzas.....30 |
| 37 | Gráfica de evolución de espectros punto MV33 |
| 38 | Gráfica de tendencia de espectros punto MV34 |
| 39 | Vibración MV vs Desalineación35 |
| 40 | Tendencia de consumo energético38 |
| 41 | Gráfica de evolución de espectros punto MA.....39 |
| 42 | Gráfica de tendencia de espectros40 |

| | | |
|----|---|----|
| 43 | Vibración MA vs Desalineación | 41 |
| 44 | Tendencia de consumo energético | 43 |
| 45 | Gráfica de evolución de espectros punto MV | 44 |
| 46 | Gráfica de tendencia de espectros punto MV | 44 |
| 47 | Vibración MV vs Desalineación | 45 |
| 48 | Gráfico de tendencia de consumo energético | 47 |
| 49 | Gráfica de evolución de espectros punto MA..... | 48 |
| 50 | Gráfica de tendencia de espectros punto MA | 49 |
| 51 | Vibración MA vs Desalineación | 50 |
| 52 | Gráfico de tendencias de consumo energético | 52 |
| 53 | Gráfica de evolución de espectros punto MV..... | 53 |
| 54 | Gráfica de tendencia de espectros | 53 |
| 55 | Vibración MV vs Desalineación | 54 |
| 56 | Gráfico de consumo energético | 56 |
| 57 | Gráfica de evolución de espectros punto MA..... | 57 |
| 58 | Gráfica de tendencias de espectros punto MA..... | 57 |
| 59 | Vibración MA vs Desalineación | 58 |
| 60 | Gráfico de tendencia de consumo energético | 60 |
| 61 | Gráfica de evolución de espectros punto MV..... | 61 |
| 62 | Gráfica de evolución de espectros punto MV | 62 |
| 63 | Vibración MV vs Desalineación | 63 |
| 64 | Gráfico de tendencia de consumo energético | 65 |
| 65 | Gráfica de evolución de espectros punto MA..... | 66 |
| 66 | Gráfica de tendencia de espectros punto MA | 66 |
| 67 | Vibración MA vs Desalineación | 67 |
| 68 | Gráfico de tendencia de consumo energético | 69 |

SIMBOLOGÍA

| | |
|-----|--|
| Fn | Frecuencia natural |
| m | Masa |
| P-P | Pico a pico |
| RMS | Root-Mean-Square (Valor medio absoluto) |
| um | Micrómetro |
| g | Gravedad |
| UTM | Universal TransverseMercator (Coordenadas universal transversal) |
| atm | Presión atmosférica |
| MA | Movimiento axial |
| MV | Movimiento |
| MH | Movimiento Horizontal |

LISTA DE ANEXOS

- A** Disposición de los equipos
- B** Eje conducido
- C** Partes de la mesa angular y paralela
- D** Hoja de características técnicas OPTALIGN PLUS
- E** Hoja de características técnicas VIBRAcheck 200
- F** Características técnicas del DT-2234C Digital Foto Tacómetro
- G** Tabla de corrientes en vacío

RESUMEN

En el presente trabajo de titulación se desarrollaron los estándares de tolerancia de desalineación y su consumo energético en motores eléctricos en el laboratorio de análisis vibracional de la Escuela de Ingeniería de Mantenimiento, mediante ensayos experimentales en un motor de trifásico de 5 HP de potencia.

Como punto de partida, y luego de analizar el estado funcional del banco de pruebas, se implementaron dos mesas de precisión para provocar un desalineamiento preciso y controlado, así también un variador de frecuencia para establecer las distintas velocidades que se requiere para realizar el estudio.

Se estableció una metodología para la recolección de datos, que consistió en el incremento progresivo de la desalineación paralela y angular; midiendo el nivel de vibración como también la intensidad de corriente de cada fase, este proceso se realizó a una velocidad de giro de 600, 1000, 1400y 1800 rpm.

Las tolerancias de desalineación se establecieron en función de los límites admisibles de vibración, con la ayuda de un modelo matemático extraído con los datos de las mediciones experimentales.

El resultado final de la ejecución de este trabajo, se muestra en una tabla de tolerancias tanto para el desalineamiento paralela como para el desalineamiento angular a sus distintas velocidades.

El presente trabajo ha cumplido con su objetivo y aporta significativamente al avance científico de la ingeniería de mantenimiento y al desarrollo de la matriz productiva de nuestro país; sin embargo se recomienda realizar el mismo tipo de estudios con diferentes tipos de acoples.

ABSTRACT

This research work was conducted to develop tolerance standard of sedimentation and its energetic consume in electric engines in the vibrational analysis labs in the maintenance engineering school by the means of experimental essays in a three-phase engine of HP of power.

After an analysis of the functional status of the test bench, two tables of precision to produce a proper and controlled misalignment were implemented. A frequency changer to establish different rates in this study was also implemented.

A methodology for data collection was determined which was a progressive increase of parallel and angular misalignment by measuring vibration level as well as intensity of flow of each phase, this process was carried out at a rotational speed 600 rpm, 1000 rpm, 1400 rpm, and 1800 rpm.

Tolerance misalignment was established based on function of the admissible vibration including a mathematical model taken from experimental measures data.

The executing final result was presented in a tolerance chart both parallel misalignment and angular misalignment at different rates.

This research has fulfilled its objective and given a significant contribution to maintenance engineering scientific development and to national productive matrix, however, it is recommended to perform the same type of study with different types of fittings.

CAPÍTULO I

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Antecedentes

La Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, acorde con el adelanto tecnológico y científico del mundo contemporáneo y en atención a la necesidad de la industria Ecuatoriana, creó la Escuela de Ingeniería de Mantenimiento, con la finalidad de formar profesionales capaces de aceptar el desafío e incursionar en el campo laboral, proponiendo proyectos de mantenimiento, como una herramienta eficaz, que garanticen la sostenibilidad de la empresa, utilizar adecuadamente y en forma racional los recursos tecnológicos modernos. Es así que hemos presentado este trabajo investigativo de tal forma que aporte a la Institución en la obtención de sus propios estándares de tolerancias de desalineación.

1.2 Justificación

La Escuela Superior Politécnica de Chimborazo al ser una Institución de Educación Superior, necesita estar a la vanguardia de los avances tecnológicos y de la innovación de métodos y técnicas modernas para la solución de problemas industriales, la Escuela de Ingeniería de Mantenimiento cuenta con un equipo de análisis vibracional, que puede determinar y evaluar la desalineación de una manera eficiente y acertada.

Actualmente no existe una norma de tolerancia de desalineación de ejes, por lo que los mismos fabricantes de equipos de alineación láser han desarrollado tablas en función de las experiencias, pero utilizan diferentes criterios y difieren mucho unas con otras.

La realización de esta tesis se justifica por la contribución que se hará con el desarrollo de los estándares de desalineación de ejes basados en los efectos que esta falla desarrolla en la vibración y consumo energético.

La contribución a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo con sus propios estándares de tolerancia de desalineación en motores eléctricos.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general. *Desarrollo de estándares de tolerancia de desalineamiento y su consumo energético de motores eléctricos en el laboratorio de análisis vibracional de la escuela de ingeniería de mantenimiento.*

1.3.2 Objetivos específicos:

- Recolectar la información necesaria para la comprensión y desarrollo de la tesis.

- Evaluar y reestructurar el banco de pruebas de desalineación.

- Definir la metodología que abarque todos los puntos de análisis contemplados en la tesis.

- Analizar los datos obtenidos y crear una tabla de tolerancias de desalineación mediante la creación de ecuaciones que respondan al comportamiento de los datos.

- Comprobar el incremento del consumo energético a distintos niveles de desalineación.

CAPITULO II

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Vibración

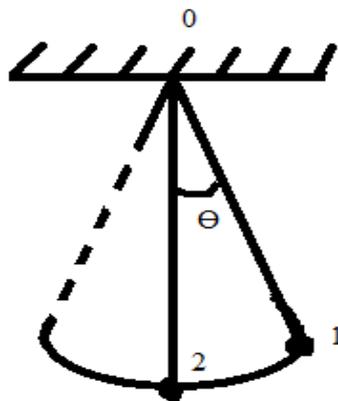
Es el movimiento relativo de un cuerpo en relación a su punto de equilibrio, dicho movimiento es originado por fuerzas de excitación, y volverá a su punto de equilibrio cuando la fuente de excitación se retire (WHITE, 2010).

2.2 Tipos de vibración

La vibración se la puede clasificar en base al tipo de fuerza que origine la excitación y por su contenido vibratorio.

2.2.1 *Vibración libre.* Se produce cuando el sistema vibratorio recibe únicamente perturbación inicial de una fuente de excitación (SINGIRESU, 2012).

. Figura 1. Vibración libre



Fuente: Vibraciones Mecánicas, 2007

2.2.2 *Vibración forzada.* Se produce cuando el sistema vibratorio está bajo la acción de una fuerza de excitación permanente (SINGIRESU, 2012).

2.2.3 *Frecuencia natural.* Está ligada a las características estructurales de los equipos como lo es su masa, la rigidez y el amortiguamiento (GARCIA, 2014).

La frecuencia natural de un sistema resorte-masa no amortiguado se da en la siguiente ecuación:

$$F_n = \frac{1}{2\pi} * \sqrt{k/m} \quad (1)$$

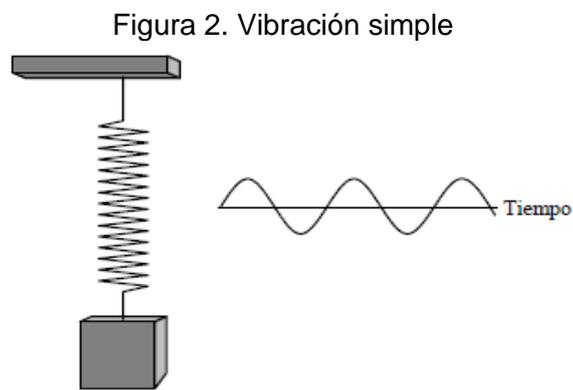
Dónde:

F_n = Frecuencia natural[Hz]

K = Constante del resorte o rigidez

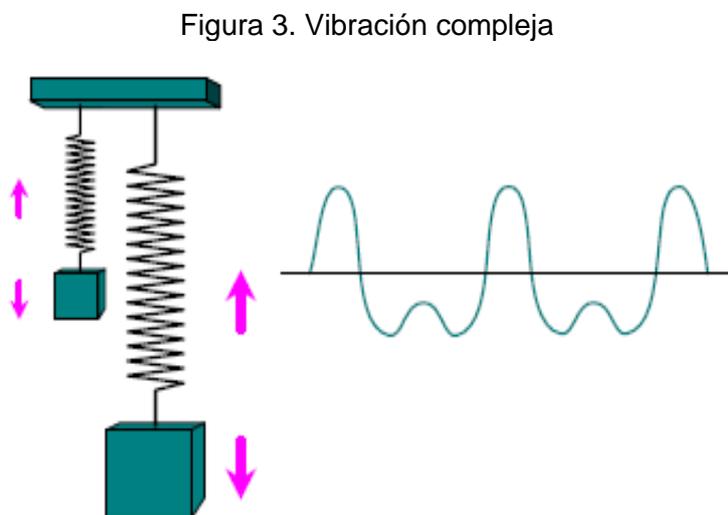
m = Masa [kg]

2.2.4 *Vibración simple.* Corresponde al movimiento más sencillo es decir al movimiento armónico simple como el resultante de un péndulo o de un sistema masa resorte (WHITE, 2010).



Fuente: WHITE, 2010

2.2.5 *Vibración compleja.* Éste tipo de vibración encuentra en sistemas vibratorios reales, ya que resulta ser la sumatoria de las vibraciones simples de los componentes del sistema (WHITE, 2010).

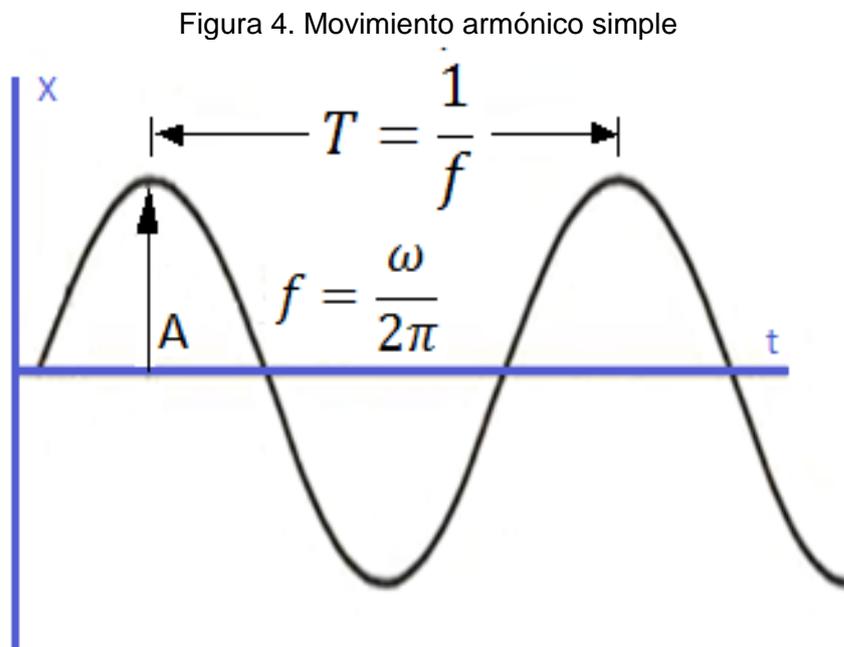


Fuente: WHITE, 2010

2.3 Elementos de una onda

2.3.1 *Amplitud.* Es la cantidad de movimiento medido desde un punto de equilibrio el cual puede ser expresado en términos de pico-pico para desplazamiento, valores cero-pico y RMS para velocidad y aceleración (WHITE, 2010). Donde el valor RMS se obtiene primero del promedio de los cuadrados de los valores de la señal compleja y segundo de la raíz cuadrada de este promedio.

2.3.2 *Fase.* La fase realmente es una medida de tiempo entre la separación de dos señales, generalmente expresada en grados (WHITE, 2010). La Figura 4 muestra dos señales sinusoidales de igual amplitud y período, pero separadas a 90 grados, lo cual indica que ambas curvas están desfasadas 90 grados.



Fuente: WOLFSON, 2011

Dónde:

A = Amplitud de onda pico a pico [μm , mm]

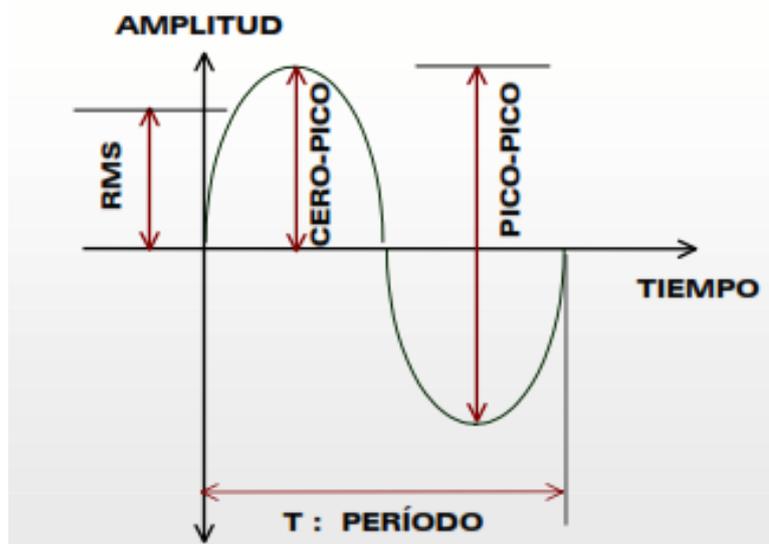
ω = Frecuencia circular o angular de oscilación [rad/seg]

T = Período de oscilación [seg , min]

F = Frecuencia de oscilación [Hz]

2.3.3 *Período.* Es el tiempo en que la onda da una oscilación completa, se expresa en unidades de tiempo (WHITE, 2010).

Figura 5. Elementos de una onda



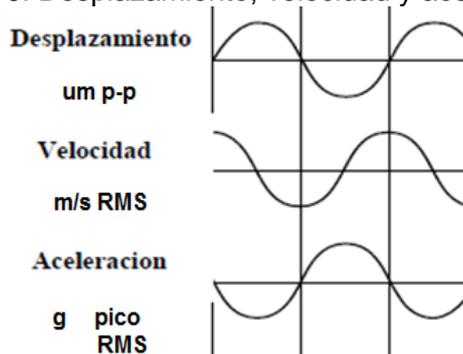
Fuente: A-MAQ, 2005

2.3.4 Frecuencia. Es el inverso al periodo y se expresa en ciclos por minuto o ciclos por segundo (WHITE, 2010).

2.4 Magnitudes de vibración

La vibración puede ser medida en las magnitudes de desplazamiento desde 10-100 Hz, velocidad de 10-1000 Hz y aceleración de 1000-10000 Hz, cada una de estas magnitudes mide ciertos modos de falla en los cuales sus efectos son más evidentes.

Figura 6. Desplazamiento, velocidad y aceleración



Fuente: WHITE, 2010

2.5 Normas de Vibraciones

Un punto importante a la hora de hablar de vibraciones es conocer la severidad de vibración, ella indica la gravedad y cuan aceptable es la vibración obtenida de un sistema vibratorio. Nos enfocaremos en la Norma ISO 10816-1:1995.

2.5.1 Norma ISO 10816-1:1995. “Vibración mecánica - Evaluación de la vibración mecánica mediante mediciones en partes no rotativas”; Parte 1 - Indicaciones generales(ISO 10816-1, 1995).

La Norma ISO 10816-1:1995 es la primera parte de un conjunto de seis partes que contiene la ISO 10816, en esta primera parte describe guías generales y procedimientos para la evaluación y medición de las vibraciones mecánicas sobre partes no rotativas, definiéndose tres parámetros de medición primarios (desplazamiento medido en micras, velocidad medida en milímetros por segundo y aceleración medida en metros por segundos cuadrados). Los criterios de evaluación se refieren únicamente a la vibración producida por la máquina en sí y no a la vibración que se transmite desde una fuente exterior.

Tabla 1. Criterios de evaluación según la velocidad de vibración

| Velocidad de vibración [mm/s] | Clases de Máquinas | | | |
|-------------------------------|--------------------|----------|-----------|----------|
| | Clase I | Clase II | Clase III | Clase IV |
| 0,18 a 0,28 | | | | |
| 0,28 a 0,45 | | A | | |
| 0,45 a 0,71 | | | | |
| 0,71 a 1,12 | | | | |
| 1,12 a 1,8 | | B | | |
| 1,8 a 2,8 | | | | |
| 2,8 a 4,5 | | C | | |
| 4,5 a 7,1 | | | | |
| 7,1 a 11,2 | | | | |
| 11,2 a 18 | | D | | |
| 18 a 28 | | | | |
| 28 a 45 | | | | |

A Bueno
B Satisfactorio
C Insatisfactorio
D Inaceptable

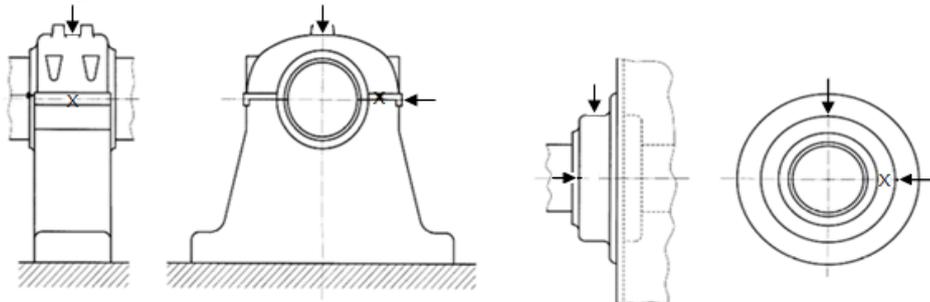
Fuente: ISO 10816 -1,1995

2.6 Ubicación de los puntos de prueba

Las mediciones se realizan en los rodamientos, cojinetes y otras piezas estructurales que responden de manera significativa a las fuerzas dinámicas y caracterizan la vibración total de la máquina. El requerimiento para el monitoreo operacional suele ser cumplido mediante la realización de una o ambas mediciones en dirección radial las cuales son vertical u horizontal ver Figura 7, estas medidas pueden complementarse

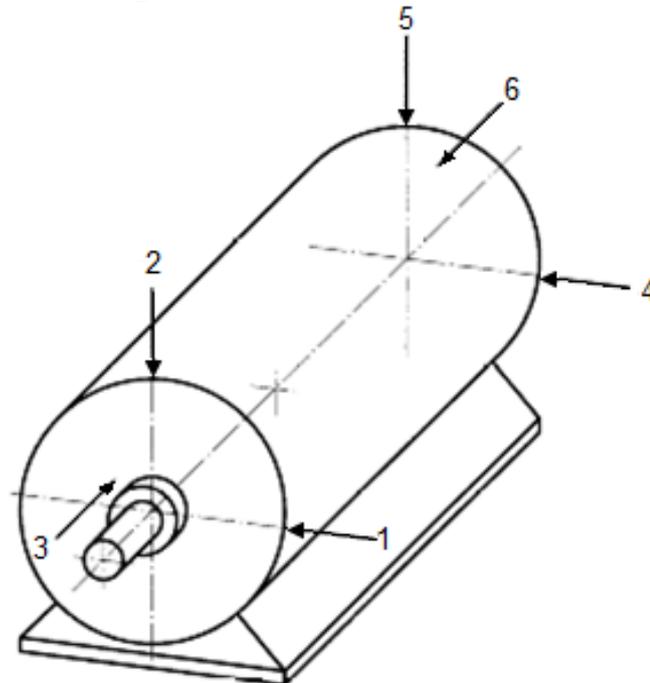
por una medición en sentido axial ver Figura 8. Este último localizado donde las fuerzas dinámicas axiales directas se transmiten en el cojinete de empuje(ISO 10816-1, 1995).

Figura 7. Medición dirección radial en chumaceras y rodamientos



Fuente: ISO 10816 -1,1995

Figura 8. Medición dirección axial



Fuente: ISO 10816 -1,1995

2.7 Equipo de medición de la vibración VIBRAcheck AVG-200

2.7.1 *Características principales del equipo de diagnóstico VIBRAcheck AVG-200.* Es un analizador portátil de vibraciones mecánicas de dos canales y un multicanal (ver Figura 9), a continuación sus aplicaciones:

- Mide aceleración, velocidad, desplazamiento y envolvente
- Mide espectros y formas de onda

- Mide órbitas
- Analiza espectros cruzados y coherencia
- Registra arranques y paradas para analizarlos con MAINTraqAnalyzer
- Balancea en uno y dos planos

Figura 9. VIBRAcheck AVG -200



Fuente: Autores

2.7.2 *Software MAINTraqpredictive.* Este programa permite el monitoreo de condición de máquinas de forma simple y efectiva, también configurar las mediciones requeridas, controlar que se realicen periódicamente y diagnosticar fallas. El analizador espectral, permite interpretar a las mediciones gracias al más completo conjunto de herramientas y la organización de las mediciones, los diagnósticos y los mantenimientos, permiten mantener ordenada a la historia de cada máquina como:

- Espectros
- Formas de onda
- Órbitas
- Espectros cruzados
- Diagrama polar
- Diagrama de Bode
- Análisis de fase
- Cascada de espectros en función de rpm

2.8 Desalineación

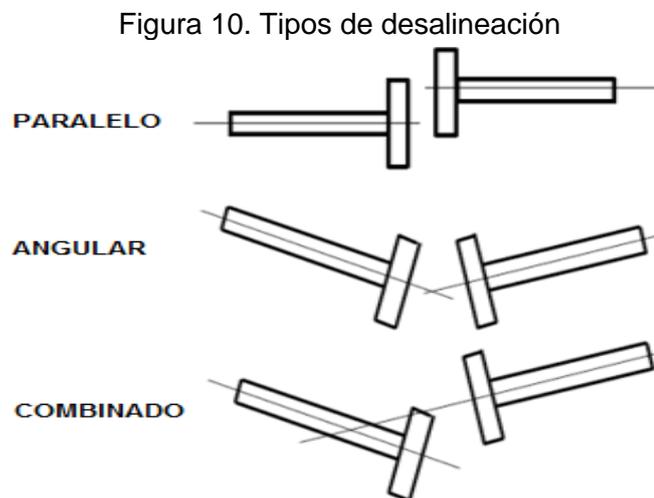
La desalineación es la falta de coincidencia espacial de los ejes geométricos correspondiente a dos árboles (ejes) de transmisión acoplados” (SÁNCHEZ, 2007).

2.8.1 *Tipos desalineación.* Entre los más comunes están:

2.8.1.1 *Desalineación paralela.* Es la distancia perpendicular entre las dos líneas geométricas de los ejes acoplados (ver Figura 10), puede haber desalineación paralela vertical y desalineación paralela horizontal (ALIGNMENT SYSTEMS, 2002).

2.8.1.2 *Desalineación angular.* Se produce cuando las líneas geométricas de los ejes acoplados forman un ángulo entre sí (ver Figura 10), la desalineación angular puede ser vertical u horizontal (ALIGNMENT SYSTEMS, 2002).

2.8.1.3 *Desalineación combinada (paralela-angular).* Es la combinación de la desalineación paralela y angular (ver Figura 10), es el caso más común (ALIGNMENT SYSTEMS, 2002).

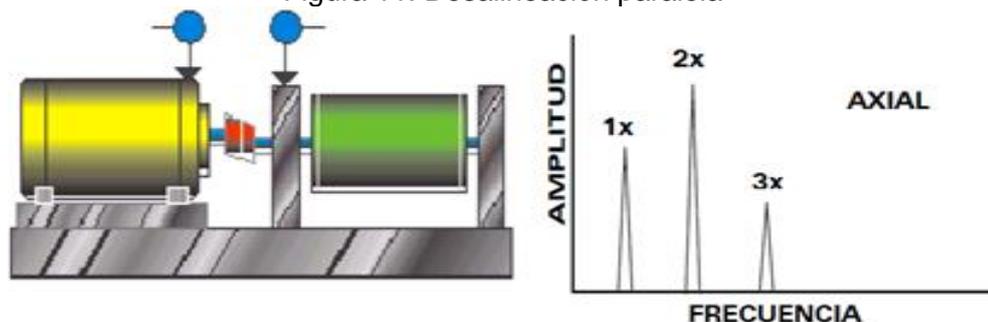


Fuente: PALOMINO, 2007

2.8.2 *Análisis de la desalineación mediante vibraciones.* Se pueden citar:

2.8.2.1 *Desalineación paralela.* La desalineación paralela presenta una vibración radial alta que se aproxima a 180° fuera de fase a través del acoplamiento. Frecuentemente 2X es mayor que 1X, pero su altura relativa a 1X la impone el tipo de acoplamiento (A-MAQ, 2005).

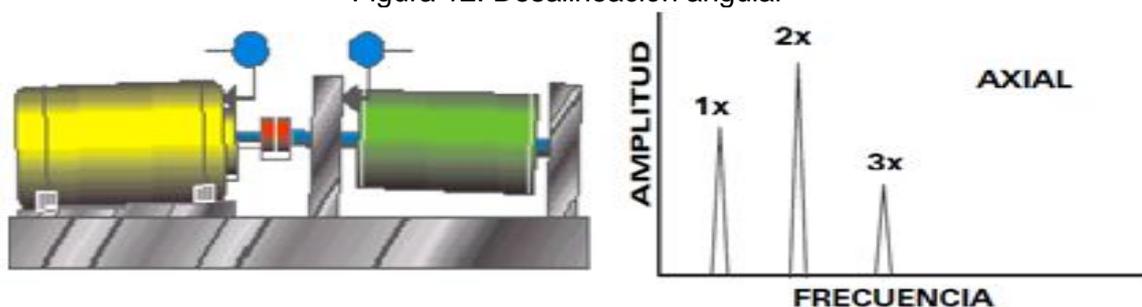
Figura 11. Desalineación paralela



Fuente: A-MAQ S.A, 2005

2.8.2.2 Desalineación angular. La desalineación angular se caracteriza por una vibración axial alta, 180° fuera de fase a través del acoplamiento. Tendrá una vibración axial alta tanto en 1X como en 2X rpm (ver Figura 12). Sin embargo, no es inusual que 1X, 2X ó 3X dominen. Estos síntomas también pueden indicar problemas de acoplamiento (A-MAQ, 2005).

Figura 12. Desalineación angular



Fuente: A-MAQ S.A, 2005

2.8.2.3 Desalineación combinada. Ocurre cuando el eje del motor y el eje conducido unidos en el acople, no son paralelos y angulares. Caracterizado por altas vibraciones axial y radial, estos síntomas también indican problemas en el acople del motor.

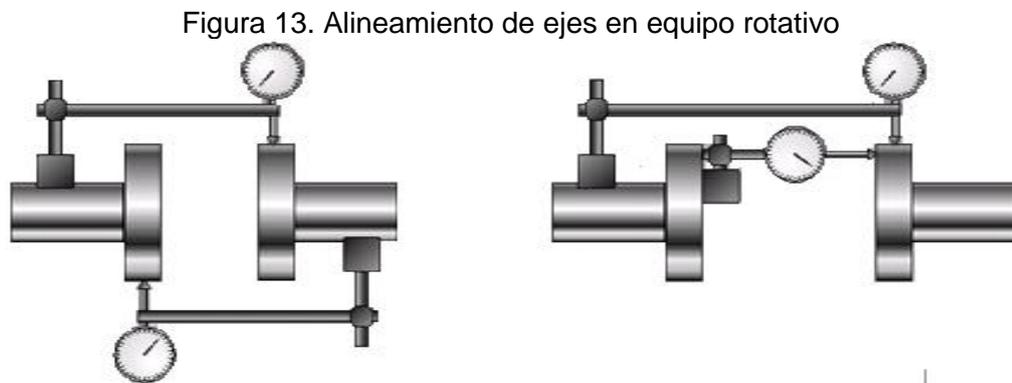
2.8.3 Tolerancias de desalineación. Para cada equipo existe un pequeño grado de desalineación en el cual puede operar sin afectar sensiblemente la vida de los elementos asociados al movimiento rotativo.

Un criterio para determinar tolerancias aplicable a todos los equipos rotativos en forma general es que a mayor velocidad de rotación o la potencia transmitida, menor es la tolerancia de desalineación de los ejes que se van acoplar en el sistema vibratorio. (SÁNCHEZ, 2007).

2.9 Alineación

Es el proceso en el que los ejes geométricos de los ejes de transmisión se hacen coincidir colonialmente o se mantienen dentro de las tolerancias admisibles de desalineación, mediante procedimientos mecánicos(SÁNCHEZ, 2007).

2.9.1 *Sistema de alineación con reloj y carátula.* Es el procedimiento clásico de alineación, su método se basa en que el reloj comparador se sujeta firmemente en la manzana de un acople y luego se lo desliza sobre el acople opuesto una vuelta completa de 360°, cada 90° se hacen registros. La apreciación que se puede alcanzar es de 1/100 mm.



Fuente: Manual de alineamiento de ejes en equipo rotativo

2.9.2 *Sistema de alineamiento láser.* Es una herramienta mucho más rápida para la alineación de ejes, su funcionamiento se basa en la radiación láser con solo una longitud de onda, el efecto de dispersión es insignificante y por tanto la precisión es alta (ALIGNMENT SYSTEMS, 2002).

Figura 14. Equipo de alineación láser



Fuente: Manual de alineamiento de ejes en equipo rotativo

2.10 Acoplamiento

Su función primordial es la de transmitir potencia entre el equipo conductor y el equipo conducido, además de esta función principal puede tener asignadas funciones secundarias como permitir pequeñas desalineaciones y desplazamientos axiales, servir de fusible mecánico ante sobrecargas, amortiguar vibraciones, etc.,(SÁNCHEZ, 2007).

2.10.1 *Tipos de acoplamientos.* Hay varios tipos de acoples cada uno diseñado para ciertos tipos de aplicaciones.

2.10.1.1 *Acoplamientos rígidos.* Este tipo de acoples unen a los ejes mediante elementos robustos de gran rigidez, este tipo de acople es empleado en sistemas que no sufren movimientos de desalineación o dilatación durante su funcionamiento (SÁNCHEZ, 2007).

- Acoplamiento de bridas
- Acoplamiento de manguito partido
- Acoplamiento de manguito
- Acoplamiento de eje intermedio

2.10.1.2 *Acoplamientos flexibles.* Estos acoples son empleados en la transmisión de pequeñas y muy pequeñas potencias (SÁNCHEZ, 2007).

- Acoplamiento de fuelle
- Acoplamiento flexible con forma de 8
- Acoplamiento de engranaje
- Acoplamiento de discos

2.10.1.3 *Acoplamientos flexibles industriales.* Estos acoples son empleados para transmitir potencias moderadas o elevadas(SÁNCHEZ, 2007).

Acoplamiento mecánicamente flexible

- Acoplamiento de engranaje
- Acoplamiento de cadena
- Acoplamiento de rejilla

- Junta universal

Acoplamiento elastómero

- Acoplamiento cortante
- Acoplamiento a compresión

Acoplamiento de membrana metálica

- Acoplamiento de disco
- Acoplamiento de diafragma

2.11 Modelo de regresión lineal

2.11.1 *Métodos de mínimos cuadrados.* El procedimiento más objetivo para ajustar una recta a un conjunto de datos presentados en un diagrama de dispersión se conoce como "el método de los mínimos cuadrados". La recta resultante presenta dos características importantes (ARIAS, 2005).

- Es nula la suma de las desviaciones verticales de los puntos a partir de la recta de ajuste.

$$\Sigma(Y_2 - Y_1) = 0 \quad (2)$$

- Es mínima la suma de los cuadrados de dichas desviaciones. Ninguna otra recta daría una suma menor de las desviaciones elevadas al cuadrado $\Sigma(Y_2 - Y_1)^2 \rightarrow 0$ (mínima).

CAPÍTULO III

3 ESTADO DEL BANCO DE PRUEBA DE DESALINEACIÓN EXISTENTE EN EL LABORATORIO DE ANÁLISIS VIBRACIONAL

El laboratorio de análisis vibraciones de la Facultad de Mecánica cuenta con un banco de pruebas que simula la desalineación paralela de ejes, la cual se realiza mediante un tornillo de potencia. El banco de pruebas cuenta con un motor trifásico de 5 Hp que opera únicamente a la velocidad nominal, transmitiendo excesiva vibración a la mesa del banco de pruebas.

3.1 Ubicación del equipo

Para determinar la ubicación exacta del equipo en estudio, se obtienen los datos, detallándose así.

3.1.1 *Ubicación geográfica y climatológica.* El banco de pruebas ha sido ubicado mediante condiciones geográficas y climatológicas. Los siguientes datos se obtuvieron en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, en la Facultad de Recursos Naturales, en el centro de sistema de información geográfica

Datos geográficos.

- País: Ecuador
- Provincia: Chimborazo
- Cantón: Riobamba
- Coordenadas proyectadas UTM zona 175: X = 758452 Norte; Y = 9816622 Este
- Altura al nivel del mar = 2817m
- Humedad relativa = 45%
- Temperatura ambiente = 23,4 °C
- Presión atmosférica = 0,7175 atm

3.1.2 *Ubicación en el laboratorio.* El laboratorio está dividido en secciones, donde cada equipo ocupa área específica (ver Anexo A). En la Figura 15 se muestra la ubicación física del banco de pruebas de desalineación paralela, encontrándose en la sección 1.

Figura 15. Disposición general del laboratorio

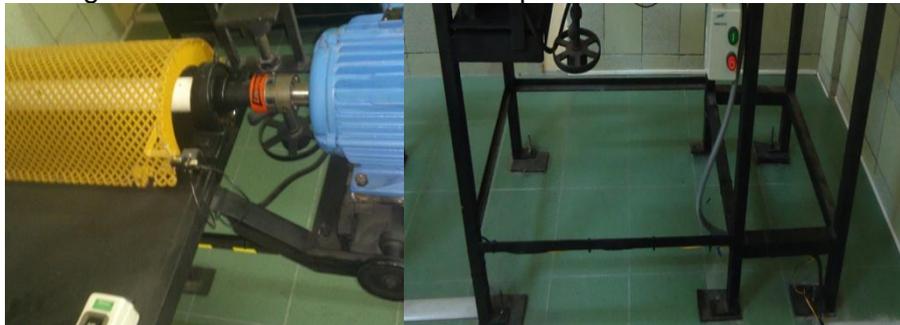


Fuente. Autores

3.2 Elementos que conforman el banco de pruebas de desalineación

3.2.1 *Estructura del banco de pruebas de desalineación.* El banco de pruebas de desalineación está construido con tubo estructural cuadrado de 2" para las patas, ángulo de 1 ½" para el marco y con tol negro de 1 mm para la base de la mesa, ver Figura 16.

Figura 16. Estructura del banco de pruebas de desalineación



Fuente. Autores

3.2.2 *Motor del banco de pruebas.* Las características del motor se muestran en la Tabla 2 y el motor en la Figura 17.

Figura 17. Motor



Fuente. Autores

Tabla 2. Datos técnicos motor banco de pruebas

| | |
|---------------|------------------|
| Marca: | WEG |
| N°. de Serie: | 01FEV07 |
| Voltaje (V): | (220/380/440) |
| Intensidad | (14.0/8.11/7.00) |
| Cosφ | 0,81 |
| Modelo: | HH89473 |
| Potencia: | 5 Hp |
| Frecuencia: | 60 |
| Rpm: | 1715 |
| N°. Fases | 3 ~ |
| Rendimiento: | 85.5 % |
| Masa | 34 kg |

Fuente. Placa del motor

3.2.3 *Mecanismo de desalineación.* El mecanismo de desalineación está compuesto por la base del motor, un volante, un tornillo de potencia y dos tuercas (ver Figura 18).

Figura 18. Mecanismo de desalineación



Fuente: Autores

3.2.4 *Eje conducido.* El eje conducido es empleado para simular en conjunto con el motor una desalineación paralela, sus dimensiones están en el Anexo B.

Figura 19. Eje conducido



Fuente: Autores

3.2.5 Acople. Es un acople flexible tipo araña de 2", empleado para transmitir la potencia del motor al eje conducido, las características del acople se pueden ver en la Tabla 5.

Figura 20. Acople flexible



Fuente: Autores

La siguiente tabla muestra las características del acople utilizado:

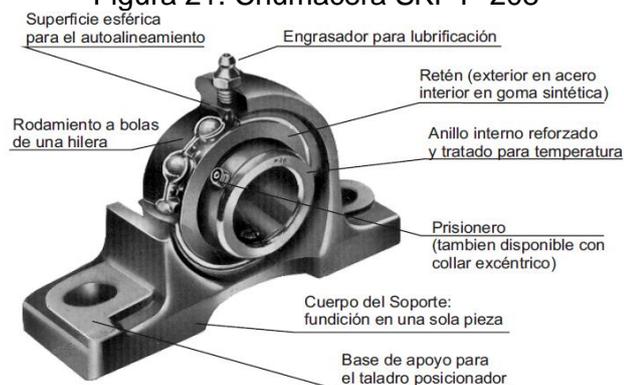
Tabla 3. Características del acople

| | |
|------------------------------|-----------------|
| Marca: | Lovejoy |
| Modelo: | L-090 |
| Diámetro exterior: | 53mm |
| Desalineación angular. Max: | $\pm 1,5^\circ$ |
| Desalineación paralela. Max: | 3,81mm |
| Torque máx.: | 16,27 Nm |
| Rpm máx.: | 9000 |

Fuente: Autores

3.2.6 Chumaceras. Las chumaceras del banco de desalineación paralela son de tipo SKF P-208, se trabaja con chumaceras por ser autoalineables y de fácil lubricación.

Figura 21. Chumacera SKF P-208



Fuente: Manual de equipo rotativo

3.3 Evaluación inicial del banco de pruebas

En la Figura 22 se aprecia el estado del banco de pruebas de desalineación paralela, donde se evaluará la estructura, el mecanismo de desalineación, el motor, el acople y las chumaceras.

Durante la primera evaluación visual se observa deficiencias en sus instalaciones y el mal estado de sus elementos, detallándose continuación.

Figura 22. Estado inicial del equipo de desalineación



Fuente: Autores

- *Evaluación de la mesa del banco de pruebas de desalineación.* La estructura se encuentra anclada al suelo mediante cuatro pernos y no tiene suficientes refuerzos entre sus partes resultando muy flexible para el nivel de vibración presente durante la operación del motor.
- *Evaluación de mecanismo de desalineación.* El mecanismo de desalineación existente solo permite realizar desalineación paralela, el cual está conformado por un tornillo de potencia con un paso aproximado de 0.5 cm y un volante de control sin ningún tipo de graduación, resultando muy difícil cuantificar y controlar la desalineación paralela.
- *Evaluación del motor.* El motor del banco de pruebas de desalineación es un motor trifásico de 5 Hp marca WEG el cual se encuentra en buen estado, esto se ha determinado mediante la medición de las resistencias de las bobinas que marcaron valores acordes al de la potencia del motor, también se realizó análisis de vibraciones a los rodamientos los que presentaron un buen estado. Las conexiones eléctricas del motor están en mal estado.

- *Evaluación del eje conducido.* Mediante una inspección visual sea determinado el buen estado del eje conducido, a esto se suma que durante la operación el eje no es sometido a ningún tipo de carga considerable.
- *Evaluación del acople.* El acople se evaluó mediante inspección visual donde se examinó la presencia fisuras y dientes despostillados, también se evaluó el estado del elastómero, a través de esta inspección se ha determinado que el acople se encuentra en buen estado.
- *Evaluación de las chumaceras.* Las chumaceras se encuentran en mal estado, esto se determinó durante su operación ya que emitieron altos niveles de ruido y temperatura para la percepción humana.

3.4 Modificación del banco de desalineación

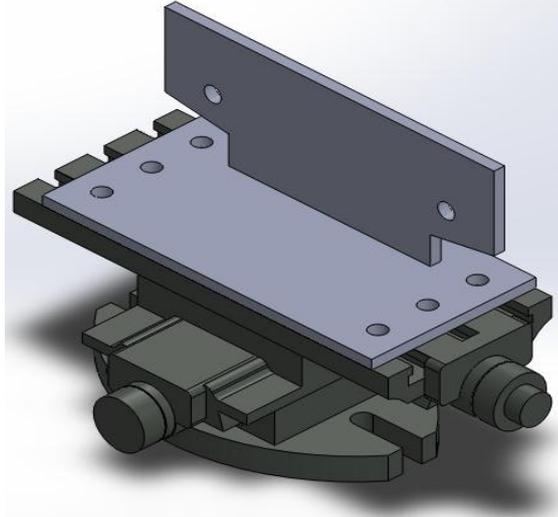
La estructura se debe anclar en las dos patas restantes y se debe reforzar en sus vértices con el mismo material para obtener mayor robustez y rigidez para evitar así falsa señales de vibración, también se debe cambiar el mecanismo de desalineación a un mecanismo que permita la desalineación paralela y angular en forma controlada y precisa, además se debe adecuar las conexiones eléctricas e instalar un variador de frecuencia que tenga las características adecuadas que sea capaz de controlar al motor y por último se deberá reemplazar las chumaceras por otras nuevas del mismo modelo.

Todas estas modificaciones son necesarias para la obtención de datos verdaderos.

3.4.1 Mecanismo de desalineación. Para el nuevo mecanismo de desalineación se ha considerado que debe ser capaz de realizar desalineación paralela, angular y combinada para lo cual se ha acoplado una mesa de desplazamiento transversal y una mesa de desplazamiento angular las mismas que permiten realizar movimientos controlados.

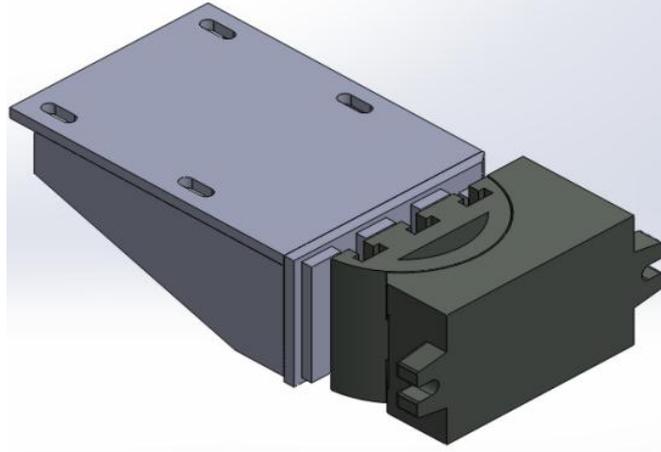
Estas mesas no pueden acoplarse por sí solas, por lo que se ha construido una base que sirve de acople entre las dos mesas (ver Figura 23), y otras base que se acopla a la mesa de desplazamiento angular donde descansará el motor (ver Figura 24), el conjunto del mecanismo de desalineación paralela y angular se puede ver en la Figura 25, las dimensiones de las placas se puede ver en el Anexo C.

Figura 23. Acople soporte-mesa de precisión paralela



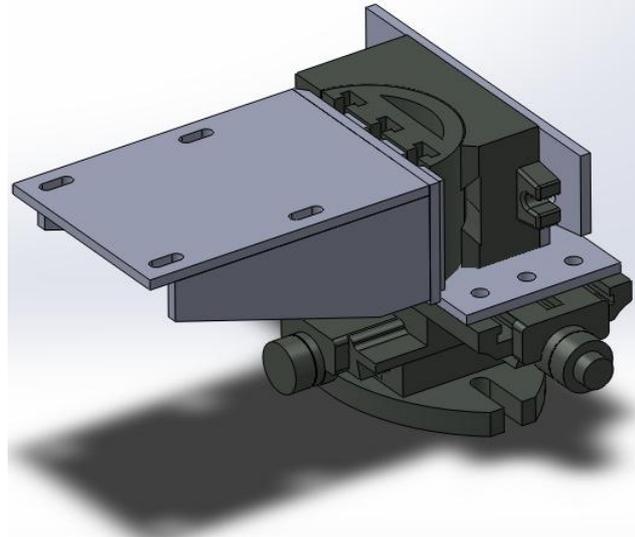
Fuente: Autores

Figura 24. Acople soporte-mesa de precisión angular



Fuente: Autores

Figura 25. Sistema completo de desalineamiento

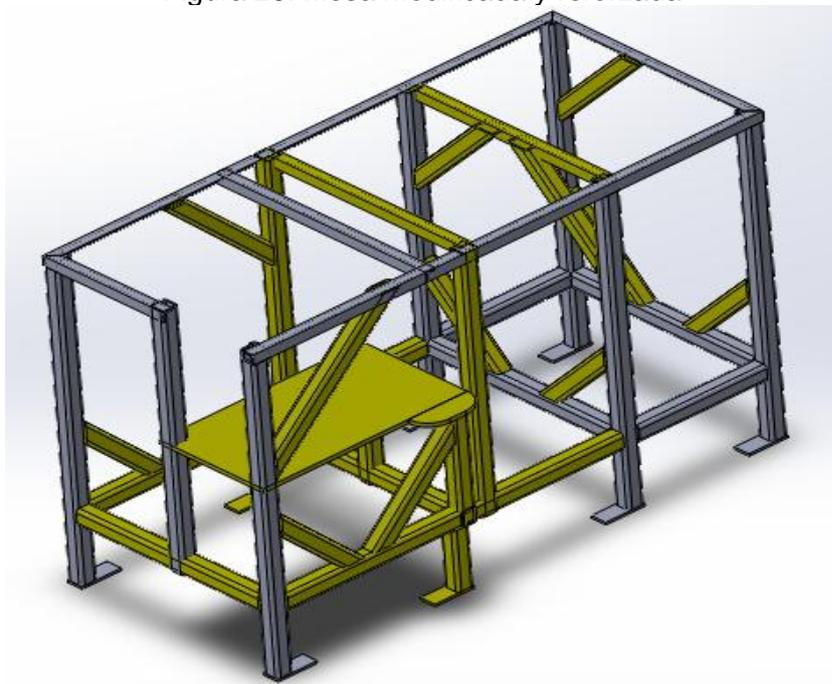


Fuente: Autores

3.4.2 *Mesa del banco de pruebas.* Para el refuerzo se ha utilizado tubo cuadrado de 2" x 2mm de espesor, con el afán de disminuir el nivel de vibración se colocó 12 travesaños en sus esquinas consiguiendo una estructura más robusta; para la base del sistema de desalineación se utilizó plancha de acero ASTM A-36 de 10mm de espesor (ver Anexo D).

Para un anclaje más firme entre el suelo y el banco de pruebas se instaló cuatro patas las que se aseguraron con pernos de expansión de 12mm. Para controlar el impacto y la vibración se colocó láminas de caucho entre el suelo y las patas (ver Figura 26).

Figura 26. Mesa modificada y reforzada



Fuente: Autores

CAPITULO IV

4. MONTAJE, CALIBRACION Y OBTENCION DE DATOS

El motor de estudio es trifásico jaula de ardillas de 5 Hp y 1750 rpm nominal, controlado por un variador de frecuencia. Se configura al motor en 600 rpm con una alineación ideal (esto es válido para la construcción de las tablas) y se toma los valores de vibración, la desalineación paralela se incrementa progresivamente tomando los valores de vibración respectivos, con todos los valores tomados se crean tablas. El mismo procedimiento se realizará para las velocidades a 1000,1400 y 1800 rpm. Nuevamente el motor se alinea y se configura a 600 rpm realizando una desalineación angular la que incrementa progresivamente tomando sus valores de vibración respectivos y se repite el mismo procedimiento para las velocidades a 1000, 1400 y 1800 rpm. De igual manera se realizará una desalineación combinada colocando inicialmente al motor en 600 rpm, donde se efectúa una desalineación paralela en conjunto con una desalineación angular progresiva, se incrementa la desalineación paralela y nuevamente se realiza una desalineación angular progresiva, este proceso continua hasta crear la tabla deseada y se repetirá para las velocidades a 1000, 1400 y 1800 rpm.

La velocidad es medida con un fototacómetro, la vibración se mide con el equipo VIBRAcheck 200 el cual se colocará el acelerómetro en sentido vertical y horizontal para medir la desalineación paralela y en sentido axial para medir la desalineación angular. El equipo de alineación laser Optalign Plus se emplea para alinear al motor para cada velocidad analizada y la pinza amperimétrica para medir la corriente alterna consumida.

4.1 Equipos de medición

Para la medición correcta del banco de pruebas se utilizaron los siguientes equipos de medición:

4.1.1 *Equipo de alineación láser.* Se alineó con el equipo Optalign Plus ver características en Anexo E, el cual es un alineador laser conformado por un transductor, un reflector, un deflector y dos brazos ajustables, en el cual se ingresan valores y se obtienen los valores de desalineación y correcciones.

Figura 27. Alienador láser Optalign Plus



Fuente: Autores

4.1.2 *Equipo de medición de vibraciones.* El equipo empleado para la medición de las vibraciones es el VIBRAcheck 200 ver características en Anexo F, el cual nos permite medir la vibración en las magnitudes de desplazamiento, velocidad y aceleración en rangos de frecuencias configurables. Las medidas obtenidas son analizadas en el software MAINtraq tanto en sus formas de onda como espectros ver Figura 28.

Figura 28. VIBRAcheck AVG 200



Fuente: Autores

4.1.3 *DT-2234C Digital Foto Tacómetro.* El foto tacómetro nos permite saber a qué velocidad gira el motor, y ajustar la velocidad a la deseada mediante el variador de frecuencia, el rango de prueba es de 2.5 – 99999 rpm, la resolución es de 0.1 rpm (2.5 - 999,9 rpm) y 1 rpm (sobre 1000 rpm), ver características en Anexo G.

Figura 29. DT-2234C Digital Foto Tacómetro.



Fuente: Autores

4.1.4 *Pinza amperimétrica.* Empleada para la medición de corriente alterna de cada línea de las tres fases.

Figura 30. Amperímetro



Fuente: Autores

4.2 Preparación del banco de pruebas

Se empleó el equipo de alineación laser Optalign Plus para determinar la desalineación del motor, efectuando las correcciones pertinentes con los shims y con las mesas de desalineación del banco de pruebas tanto paralela y angular, también se colocó cinta reflectiva en el acople flexible para medir las rpm mediante el fototacómetro (ver Figura 31).

Figura 31. Preparación del banco de pruebas



Fuente: Autores

4.2.1 Puntos de medición. El posicionamiento de los acelerómetros ha sido realizado en base a las instrucciones del manual de VIBRAcheck200, determinando como apoyo el lado acoplado del motor ya que es el lado más cercano al acople y como puntos los que se ven en la Figura 32.

- Movimiento axial, desalineación paralela
- Movimiento vertical, desalineación paralela
- Movimiento horizontal, desalineación angular

Figura 32. Puntos de medición



Fuente: Autores

4.2.2 Rangos de frecuencia y velocidad. Se ha establecido diferentes rangos de trabajo para la toma de mediciones en el banco de pruebas, según nuestro criterio se definió en 4 niveles de velocidad (ver Tabla 6), es decir que se obtendrán tolerancias en las 4 velocidades, mediciones las cuales se configurarán con el variador de frecuencia y el fototacómetro.

Tabla 4. Rangos de frecuencia y velocidad.

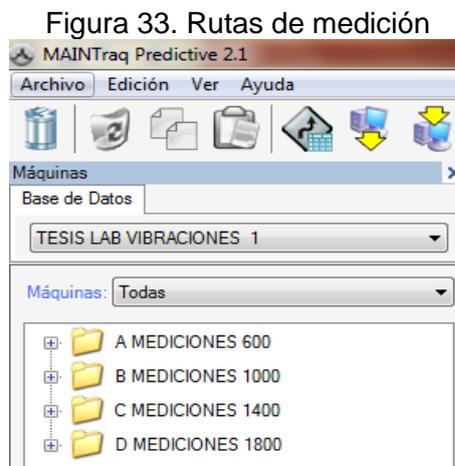
| Rangos | ω [rpm] | f [Hz] |
|--------|----------------|----------|
| 1 | 600 | 22.5 |
| 2 | 1000 | 33.5 |
| 3 | 1400 | 46.9 |
| 4 | 1800 | 60.3 |

Fuente: Autores

4.3 Desarrollo de rutas

Para la toma de datos de vibraciones en el motor del banco de pruebas de desalineación es necesario desarrollar en el programa MAINTraq rutas de medición de forma específica y organizada para la interpretación.

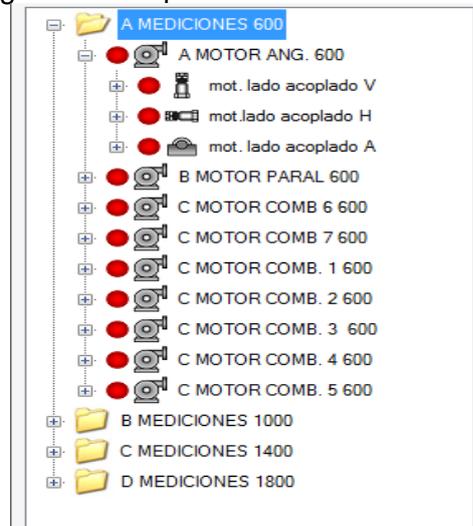
4.3.1 Creación de carpetas. Como se va hacer 4 mediciones a diferentes velocidades se ha procedido a la creación de 4 carpetas según las rpm escogidas en el literal 4.2.2.



Fuente: Autores

4.3.2 Creación de rutas en las carpetas. Se ha desarrollado rutas para la medición de la vibración en las desalineaciones angular, paralela y siete combinadas en las velocidades de 600, 1000, 1400 y 1800 rpm.

Figura 34. Carpeta: Mediciones a 600 rpm



Fuente: Autores

4.4 Desalineación paralela

Inicialmente se alineó al motor obteniendo una desalineación paralela de 0.02mm que está dentro del rango admisible para el motor del banco de pruebas, este proceso se repite para las mediciones en las 4 velocidades determinadas en el literal 4.2.2, (ver Figura 35).

Figura 35. Desalineación



Fuente: Autores

4.4.1 Desalineación paralela a 600, 1000, 1400 y 1800 rpm. Para 600 rpm se empezó con desalineación de 0.02mm y se fue incrementando con goniómetro de la mesa de desalineación paralela hasta 2mm, para 1000 rpm se comenzó con 0,02mm y se fue incrementando la desalineación hasta 1,2mm, para 1400 rpm se empezó con 0,02mm y se fue incrementando desalineación hasta 0,6mm, para 1800 rpm se empezó con desalineación de 0,02mm y se fue incrementando la desalineación hasta 0,8mm, para cada una de estas el valor límite de desalineación fue cuando se detectó ruidos excesivos y la vibración global media fue $>4,7\text{mm/s}$ donde ya no es permisible la desalineación.

4.5 Desalineación angular

Se determinó los avances de desalineación angular mediante conversiones y procesos matemáticos, sabiendo que para desalinear 1 grado, se desplaza 12 líneas en el goniómetro de la meza de desalineamiento así mismo que $180^\circ = \pi \text{ rad}$; obteniendo como resultado que cada línea equivale a 0,00145 rad, o 1,45 mrad.

4.5.1 Desalineación angular a 600, 1000, 1400 y 1800 rpm. Se inició con 2 mrad de desalineación en los diferentes rangos de medición establecidos a 600 rpm con un

ángulo de 4° que equivale a 70 mrad, para 1000 rpm con un ángulo de $3,1^\circ$ que equivale a 54 mrad, para 1400 rpm con un ángulo de $2,75^\circ$ que equivale a 48mrad y para 1800 rpm con un ángulo de $2,16^\circ$ que equivale a 70mrad, mediante la calibración de goniómetro se incrementa la desalineación hasta que se detecta ruidos excesivos y la vibración global del banco de pruebas medida fue $> 4,7\text{mm/s}$ donde ya no es permisible la desalineación.

4.6 Toma de medidas de la corriente

Como no se tiene una carga aproximada del 80% de la capacidad nominal del motor, las pruebas se hacen en vacío midiendo los valores de corriente en cada línea en la entrada del variador de frecuencia, en el anexo I se ve la tabla de equivalencias de corrientes según su número de polos para motores de uso general en vacío. Los datos recolectados y sus respectivos cálculos se mostrarán en el Anexo H.

Figura 36. Amperímetro de pinzas



Fuente: Autores

4.6.1 *Consumo energético paralelo a 600, 1000, 1400 y 1800 rpm.* Para todas las velocidades de estudio se establece los parámetros de desalineación, midiendo el consumo de corriente con las pinzas amperimétrica a la entrada del variador de frecuencia para cada una de las tres fases y para cada velocidad. En la Tabla 5 se muestra las medidas de desalineación realizada para cada velocidad.

4.6.2 *Consumo energético angular a 600, 1000, 1400 y 1800 rpm.* Para todas las velocidades de estudio se establece los parámetros de desalineación, midiendo la el consumo de corriente con las pinzas amperimétrica a la entrada del variador de frecuencia para cada una de las fases y para cada velocidad. En la Tabla 6 se muestra las medidas de desalineación realizada para cada velocidad

Tabla 5. Desalineación paralela

| Desalineación paralela [mm] | | | |
|------------------------------------|-----------------|-----------------|-------------|
| 600 | 1000 rpm | 1400 rpm | 1800 |
| 0.00 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 0.4 | 0.2 | 0.1 | 0.1 |
| 0.8 | 0.4 | 0.2 | 0,2 |
| 1.2 | 0.6 | 0.3 | 0.3 |
| 1.6 | 0.8 | 0.4 | 0.4 |
| 2.0 | 1.0 | 0.5 | 0.5 |
| | 1.2 | 0.6 | 0.6 |
| | | | 0.7 |
| | | | 0,8 |

Fuente: Autores

Tabla 6. Medidas de desalineación angular para el análisis de consumo energético

| Desalineación angular [mrad] | | | |
|-------------------------------------|-----------------|----------------|-----------------|
| 600 rpm | 1000 rpm | 1400 pm | 1800 rpm |
| 0 | 0 | 0 | 0.0 |
| 14 | 10 | 10 | 6 |
| 28 | 20 | 20 | 12 |
| 42 | 30 | 30 | 18 |
| 56 | 40 | 40 | 24 |
| 70 | 54 | 48 | 38 |

Fuente: Autores

CAPITULO V

5 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Se muestra el análisis realizado en el motor jaula de ardilla de 5 Hp, marca WEG, en el punto más cercano al acople, sometido a desalineaciones paralelas y angulares tolerables en las siguientes velocidades: a 600, 1000, 1400 y 1800 rpm respectivamente. Estas velocidades ya fueron anteriormente seleccionadas en el capítulo anterior.

Los datos obtenidos son recolectados y presentados en tablas, así mismo representados en gráficas donde se ve claramente la evolución espectral de la vibración bajo la influencia de la desalineación tanto paralela como angular, también se expresan en gráficas de tendencias de la vibración en función de la desalineación, mostrando los valores de desalineación aplicados con su vibración correspondiente para cada punto evaluado.

Se sabe que la desalineación produce por la fricción de los elementos que conforman el sistema vibratorio y por las tensiones internas produce un incremento del consumo eléctrico, por lo que en la presente tesis se confirmara lo antes dicho mediante tablas comparativas obtenidas en las diferentes desalineaciones aplicadas al motor de estudio.

5.1 Desalineación del motor a 600 rpm

5.1.1 *Desalineación paralela.* Ésta desalineación se realiza desplazando del eje del motor del banco de pruebas en sentido horizontal con relación al centro del eje conducido mediante la mesa de desalineación paralela.

5.1.1.1 *Gráfica de evolución de espectros.* También denominada gráfica tipo cascada, esta gráfica nos permite detallar y observar el espectro por cada incremento de la desalineación pudiendo observar la diferencia del espectro en su incremento de amplitud entre dos puntos: tanto inicial y final; es decir cómo el espectro de vibración inicial evoluciona por efecto del aumento de la desalineación, observándose en el espectro final un incremento considerable de las amplitudes. Lo expuesto se puede observar en la figura número 37

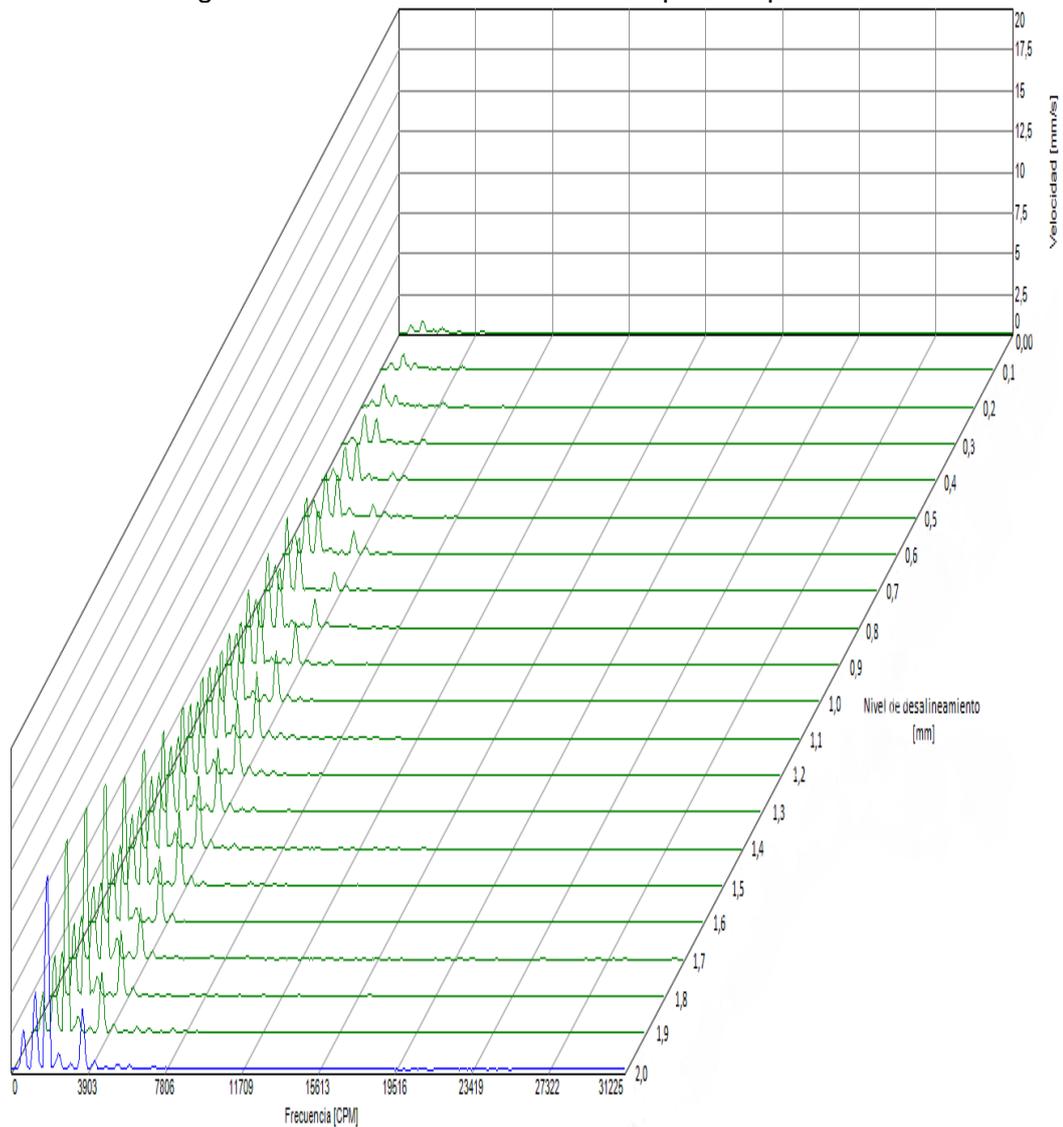
El gráfico de cascada de la Figura 37 consta de tres ejes (x,y,z), donde:

Eje x: Frecuencia (CPM)

Eje y: Velocidad (mm/s) (amplitud)

Eje z: Nivel de desalineación (mm)

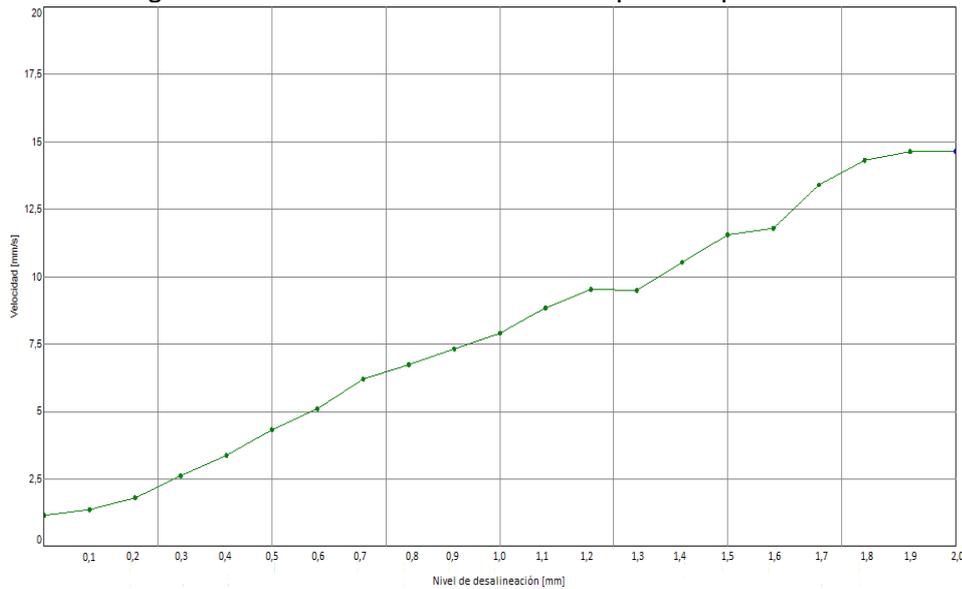
Figura 37. Gráfica de evolución de espectros punto MV



Fuente: Autores

5.1.1.2 Gráfica de tendencia de espectros. La gráfica de tendencias tiene relación con la gráfica tipo cascada, ya que los espectros de vibración tomados son almacenados y representados como puntos en un plano cartesiano, visualizando fácilmente la evolución en los niveles de vibración que están relacionados con el incremento progresivo de la desalineación.

Figura 38. Gráfica de tendencia de espectros punto MV



Fuente: Autores

5.1.1.3 *Tabla de desalineación vs vibración.* En la Tabla 7 se encuentran los valores de desalineación paralela y su vibración respectiva, empezando con una alineación ideal para el análisis, como se mostró en la sección 4.4.

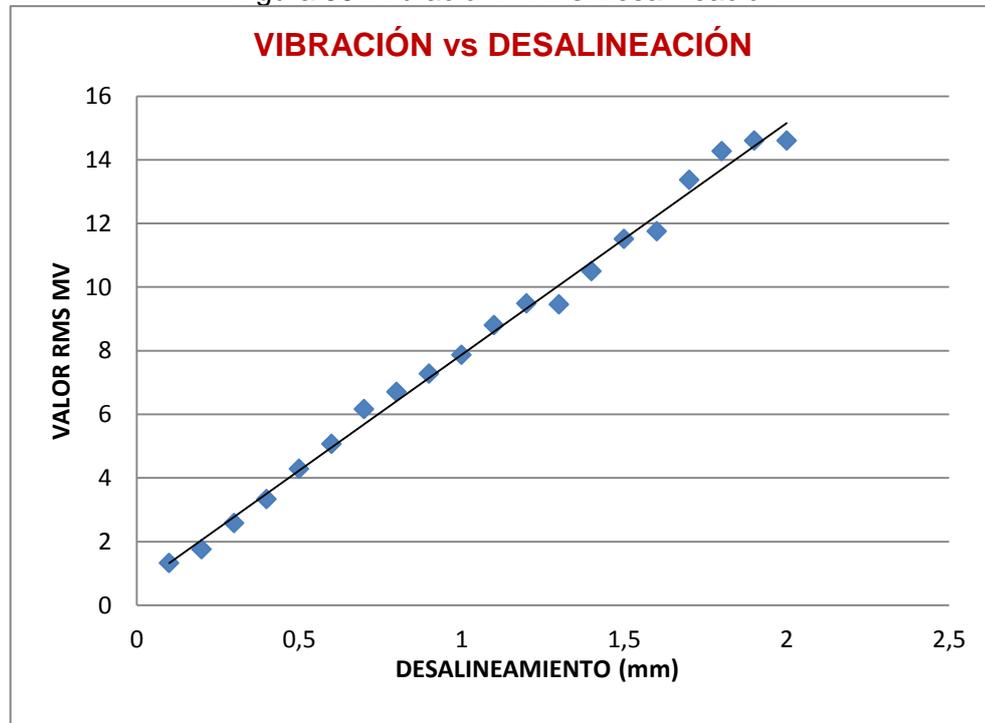
Tabla 7. Datos de desalineación paralela a 600 rpm

| N° Medidas | Desalineación [mm] | Valores RMS | |
|------------|--------------------|-------------|-------|
| | | MV | MA |
| 1 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 2 | 0,1 | 1,33 | 0,9 |
| 3 | 0,2 | 1,765 | 1,899 |
| 4 | 0,3 | 2,586 | 0,809 |
| 5 | 0,4 | 3,341 | 1,194 |
| 6 | 0,5 | 4,286 | 1,224 |
| 7 | 0,6 | 5,072 | 1,478 |
| 8 | 0,7 | 6,165 | 2,133 |
| 9 | 0,8 | 6,708 | 2,298 |
| 10 | 0,9 | 7,284 | 3,21 |
| 11 | 1,0 | 7,87 | 3,477 |
| 12 | 1,1 | 8,809 | 4,159 |
| 13 | 1,2 | 9,491 | 4,199 |
| 14 | 1,3 | 9,455 | 4,210 |
| 15 | 1,4 | 10,505 | 4,669 |
| 16 | 1,5 | 11,519 | 4,8 |
| 17 | 1,6 | 11,757 | 4,503 |
| 18 | 1,7 | 13,373 | 5,406 |
| 19 | 1,8 | 14,278 | 5,562 |
| 20 | 1,9 | 14,602 | 5,287 |
| 21 | 2,0 | 14,602 | 5,287 |

Fuente: Autores

Con los valores obtenidos se realiza un gráfico: vibración MV vs desalineación; con el fin de observar los efectos de la desalineación paralela, ver Figura 39.

Figura 39. Vibración MV vs Desalineación



Fuente: Autores

5.1.1.4 Regresión lineal. En la Figura 39 se observa la semejanza de los puntos con una línea recta dependiente positiva, indicando que el nivel vibratorio es creciente y directamente proporcional al nivel de desalineación, para obtener la ecuación de la recta se procede a realizar una regresión lineal por el método de los mínimos cuadrados. Su ecuación característica es:

$$y = ax + b \quad (3)$$

Dónde:

y= variable dependiente

a= pendiente

b= intersección de la ordenada en y

x= valor de la variable independiente

Se construye la Tabla 8 de datos para el ajuste de un conjunto de datos al modelo de regresión lineal.

Tabla 8. Datos de regresión

| X_i | Y_i | $(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})$ | $(X_i - \bar{X})^2$ | $(Y_i - \bar{Y})^2$ |
|--|---|----------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|
| 0,1 | 1,330 | 6,564 | 0,903 | 47,747 |
| 0,2 | 1,765 | 5,504 | 0,723 | 41,924 |
| 0,3 | 2,586 | 4,240 | 0,563 | 31,967 |
| 0,4 | 3,341 | 3,184 | 0,423 | 23,999 |
| 0,5 | 4,286 | 2,175 | 0,303 | 15,633 |
| 0,6 | 5,072 | 1,426 | 0,203 | 10,036 |
| 0,7 | 6,165 | 0,726 | 0,123 | 4,305 |
| 0,8 | 6,708 | 0,383 | 0,062 | 2,347 |
| 0,9 | 7,284 | 0,143 | 0,022 | 0,914 |
| 1,0 | 7,870 | 0,018 | 0,002 | 0,137 |
| 1,1 | 8,809 | 0,028 | 0,003 | 0,324 |
| 1,2 | 9,491 | 0,188 | 0,023 | 1,565 |
| 1,3 | 9,455 | 0,304 | 0,063 | 1,476 |
| 1,4 | 10,505 | 0,793 | 0,123 | 5,131 |
| 1,5 | 11,519 | 1,476 | 0,203 | 10,752 |
| 1,6 | 11,757 | 1,934 | 0,303 | 12,370 |
| 1,7 | 13,373 | 3,337 | 0,423 | 26,349 |
| 1,8 | 14,278 | 4,529 | 0,563 | 36,459 |
| 1,9 | 14,602 | 5,408 | 0,723 | 40,476 |
| 2,0 | 14,602 | 6,044 | 0,903 | 40,476 |
| $\Sigma\bar{X}=1,05$ | $\Sigma\bar{Y}=8,240$ | $\Sigma=8,404$ | $\Sigma=6,650$ | $\Sigma=354,387$ |

Fuente: Autores

Los estimadores para el ajuste del modelo se calculan de la siguiente manera:

$$a = \frac{\Sigma(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\Sigma(X_i - \bar{X})^2} \quad (4)$$

$$a = \frac{48,404}{6,650} \gg a = 7,2787$$

$$b = \bar{Y} - (a)(\bar{X}) \quad (5)$$

$$b = 8,240 - (7,2787)(1,05) \gg b = 0,5972$$

Sustituyendo los valores calculados en la ecuación característica se tiene:

$$y = 7,2787x + 0,5972$$

Para determinar el grado de ajuste del modelo, se calcula el coeficiente de determinación, de la siguiente manera:

$$r = \frac{\sum(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum(X_i - \bar{X})^2 \sum(Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (6)$$

$$r = \frac{48,404}{\sqrt{(6,650)(354,387)}} \Rightarrow r = 0,9971$$

Se observa que el grado de ajuste $r = 0,9971$ del modelo es alto, indicando alta confiabilidad para obtener el valor, que será la tolerancia de desalineación paralela para esta velocidad.

5.1.1.5 Tolerancia de desalineación. Basándonos en la Norma ISO 10816-1, la cual clasifica a las máquinas en grupos de acuerdo a la potencia del motor, el equipo de ensayos está dentro de la Clase I por ser un motor de 3,7 kW, el cual tiene una tolerancia de 0,71 rms. Para obtener el valor de tolerancia reemplazamos “y” con 0,71 rms por ser la vibración máxima admisible, y asumimos un alineación ideal lo que elimina la constante 0,5972.

$$y = 7,2787x + 0,5972$$

Dónde:

y = nivel de vibración o tolerancia

x = Desalineación [mm]

$$y = ax + b$$

$$0,71 = 7,2787(x) + 0$$

$$x = \frac{0,71}{7,2787} \gg x = 0,0975$$

El valor de x es la cifra que se obtiene mediante el cálculo matemático y se establece para las tablas de estándares de tolerancia, esto significa que en desalineación paralela a una velocidad de 600 rpm, es admisible hasta 0,1 mm de desalineación para el caso de este estudio.

5.1.1.6 Consumo energético. En el proceso de la progresión de la desalineación, se tomaron medidas de corriente, para evaluar la evolución del consumo energético a causa de la desalineación, ver Tabla 9.

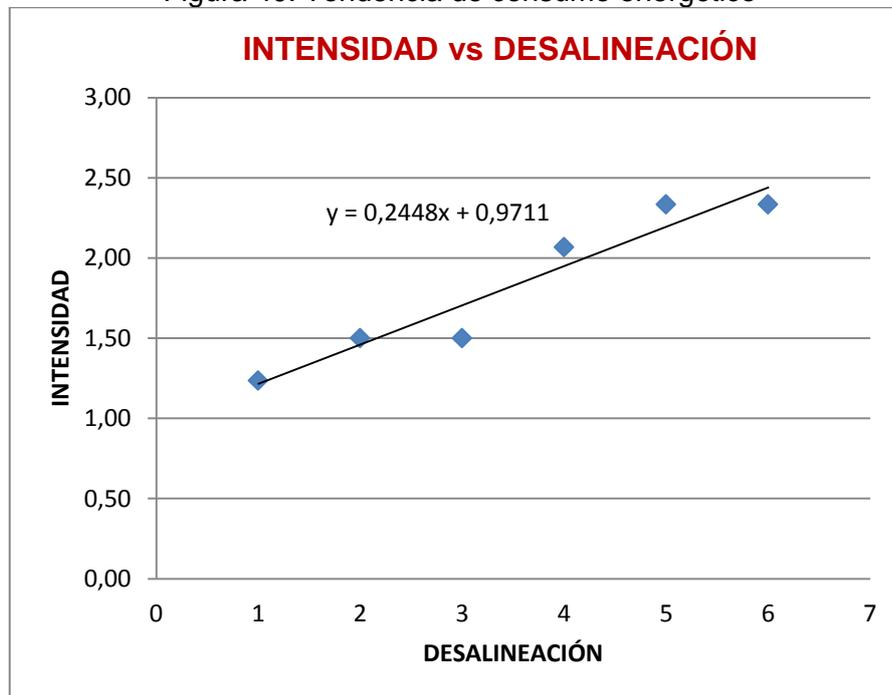
Tabla 9. Desalineación vs Corriente

| Desalineación Paralela[mm] | Intensidad I [A] | Intensidad II [A] | Intensidad III [A] | Intensidad Equivalente [A] | Voltaje [V] |
|----------------------------|------------------|-------------------|--------------------|----------------------------|-------------|
| 0,00 | 1,5 | 1,5 | 0,7 | 1,23 | 210 |
| 0,4 | 1,7 | 1,6 | 1,2 | 1,50 | 210 |
| 0,8 | 1,7 | 1,4 | 1,4 | 1,50 | 210 |
| 1,2 | 2,5 | 1,9 | 1,8 | 2,07 | 210 |
| 1,6 | 2,8 | 2,3 | 1,9 | 2,33 | 210 |
| 2,0 | 2,5 | 2,4 | 2,1 | 2,33 | 210 |

Fuente. Autores

Con los datos obtenidos en la Tabla 13 se construye una gráfica (ver Figura 40), donde se determina que el amperaje es directamente proporcional a la desalineación, afirmando que la desalineación está asociada a un incremento del consumo eléctrico.

Figura 40. Tendencia de consumo energético



Fuente: Autores

Se tiene la intensidad nominal del motor por medio del dato de placa (14A), se puede calcular el porcentaje de trabajo del motor que realiza en cada desalineación y calcular el valor a pagar.

Tabla 10. Trabajo del motor

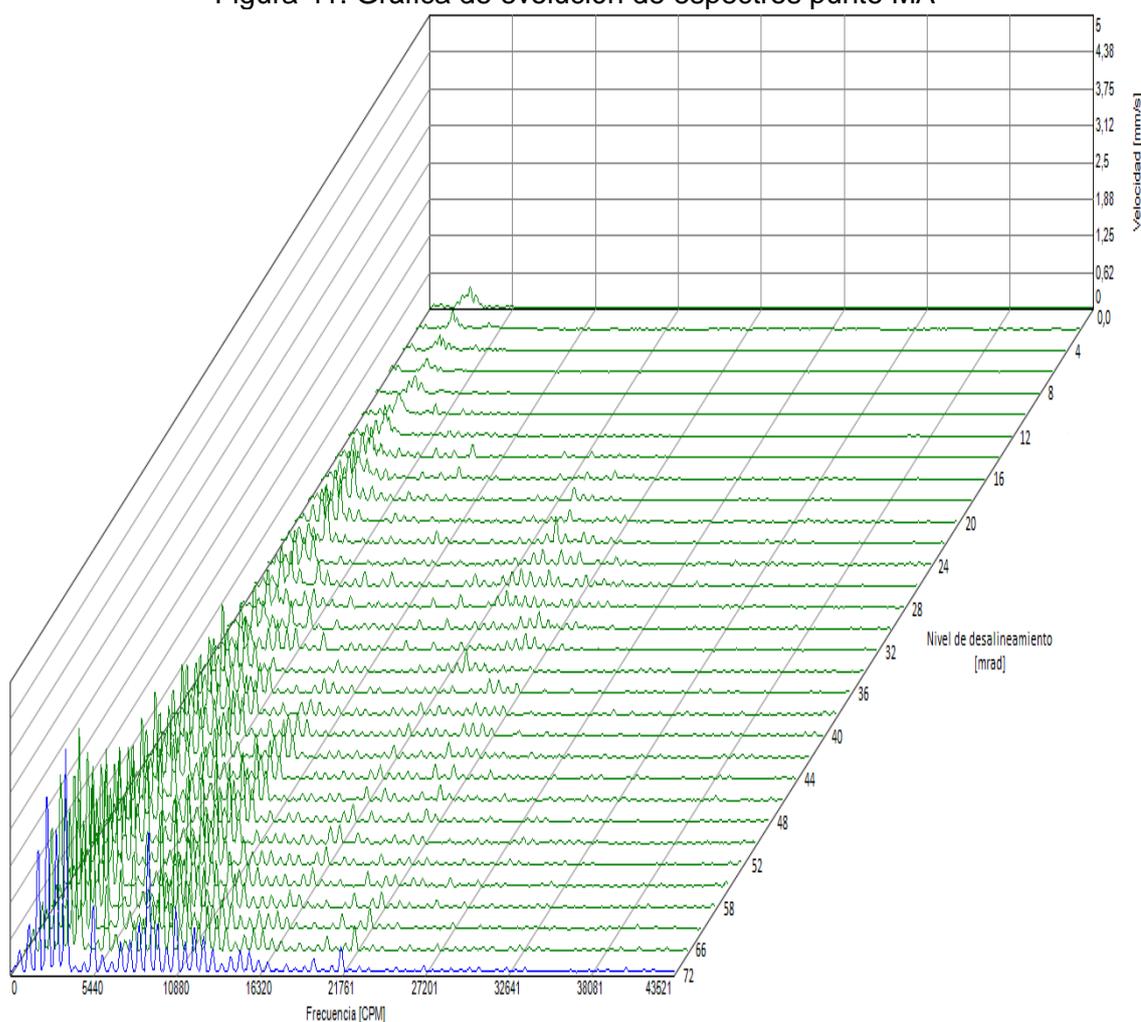
| Desalineación | Trabajo [%] | Potencia [kW] | Consumo anual[kW] | Costo [USD] |
|---------------|-------------|---------------|-------------------|-------------|
| 0,00 | 9 | 0,38 | 3289 | 329 |
| 0,4 | 11 | 0,46 | 4000 | 400 |
| 0,8 | 11 | 0,46 | 4000 | 400 |
| 1,2 | 15 | 0,64 | 5511 | 551 |
| 1,6 | 17 | 0,72 | 6222 | 622 |
| 2,0 | 17 | 0,72 | 6222 | 622 |

Fuente: Autores

5.1.2 Desalineación angular.

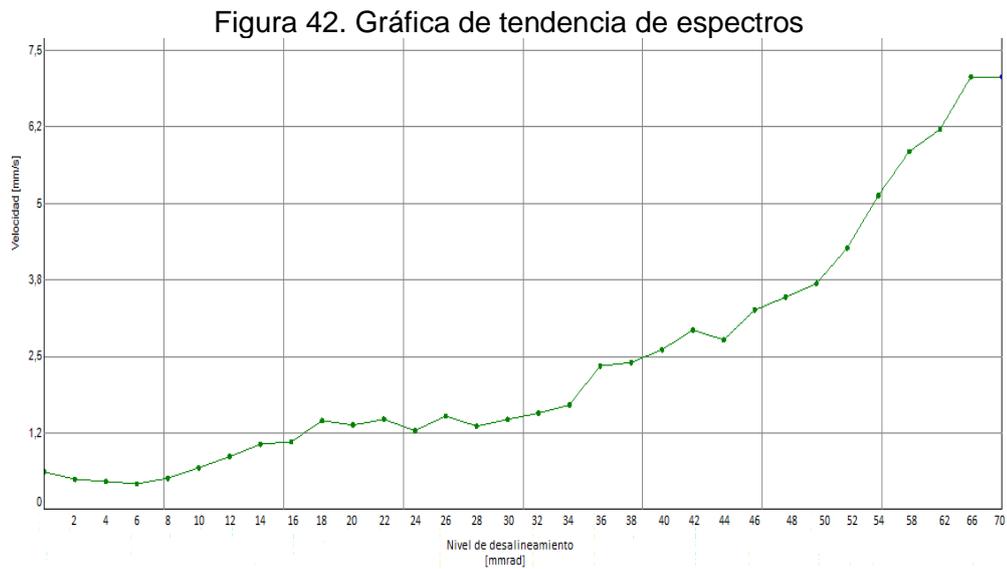
5.1.2.1 *Gráfica de evolución de espectros.* En el proceso de la progresión de la desalineación, se tomaron medidas de corriente, para evaluar la evolución del consumo energético a causa de la desalineación, ver Tabla 9.

Figura 41. Gráfica de evolución de espectros punto MA



Fuente: Autores

5.1.2.2 Gráfica de tendencia de espectros



Fuente: Autores

5.1.2.3 Tabla de desalineación vs vibración. En la Tabla 11 se muestra una porción de los datos medidos los cuales son usados para la construcción de la Gráfica 43, el resto de los datos se pueden ver en el Anexo I. de los datos se fueron influenciados en mayor medida por factores no controlados como la frecuencia natural de la estructura.

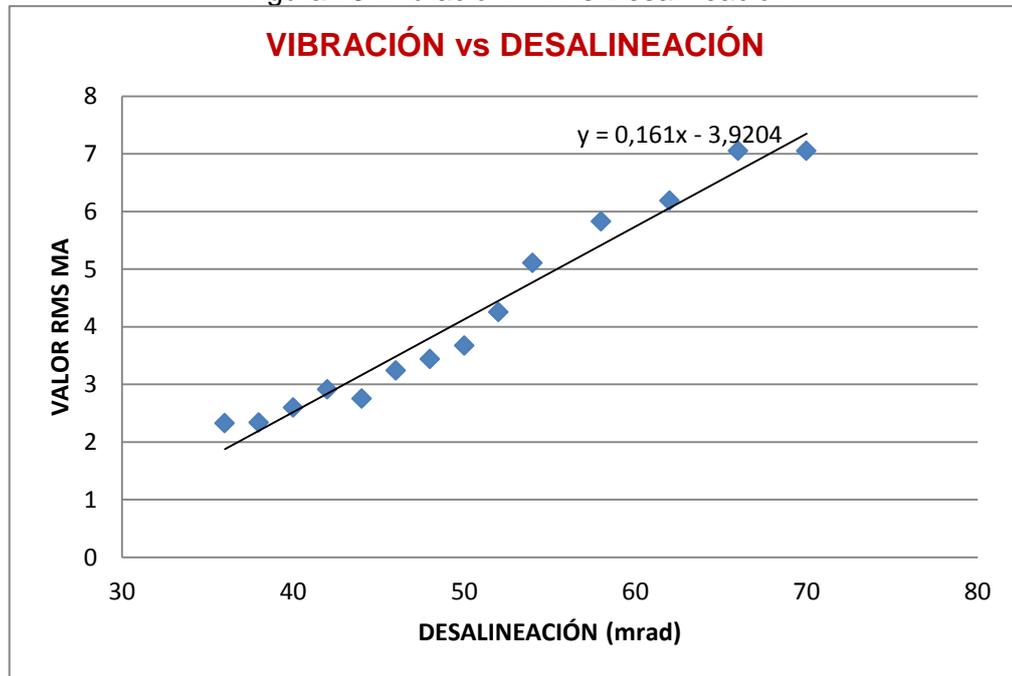
Tabla 11. Datos de desalineación angular a 600 rpm

| N° Medidas | Desalineación [mrad] | Valores RMS | |
|------------|----------------------|-------------|-------|
| | | MV | MA |
| 1 | 36 | 1,342 | 2,331 |
| 2 | 38 | 1,662 | 2,338 |
| 3 | 40 | 1,613 | 2,601 |
| 4 | 42 | 1,789 | 2,917 |
| 5 | 44 | 2,656 | 2,757 |
| 6 | 46 | 2,83 | 3,243 |
| 7 | 48 | 3,14 | 3,445 |
| 8 | 50 | 3,253 | 3,677 |
| 9 | 52 | 2,937 | 4,259 |
| 10 | 54 | 3,34 | 5,111 |
| 11 | 58 | 4,365 | 5,827 |
| 12 | 62 | 7,00 | 6,192 |
| 13 | 66 | 7,121 | 7,052 |
| 14 | 70 | 4,365 | 7,052 |

Fuente: Autores

Con los valores obtenidos se realiza un gráfico vibración MA vs desalineación con el fin de observar los efectos de la desalineación angular, ver Figura 43

Figura 43. Vibración MA vs Desalineación



Fuente: Autores

5.1.2.4 Regresión lineal

Tabla 12. Datos de regresión

| X_i | Y_i | $(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})$ | $(X_i - \bar{X})^2$ | $(Y_i - \bar{Y})^2$ |
|--|---|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| 36 | 2,331 | 26,969 | 208,18 | 3,494 |
| 38 | 2,338 | 23,144 | 154,47 | 3,468 |
| 40 | 2,601 | 16,677 | 108,76 | 2,557 |
| 42 | 2,917 | 10,815 | 71,04 | 1,646 |
| 44 | 2,757 | 9,277 | 41,33 | 2,083 |
| 46 | 3,243 | 4,239 | 19,61 | 0,916 |
| 48 | 3,445 | 1,834 | 5,90 | 0,570 |
| 50 | 3,677 | 0,224 | 0,18 | 0,274 |
| 52 | 4,259 | 0,092 | 2,47 | 0,003 |
| 54 | 5,111 | 3,253 | 12,76 | 0,830 |
| 58 | 5,827 | 12,318 | 57,33 | 2,647 |
| 62 | 6,192 | 23,049 | 133,90 | 3,967 |
| 66 | 7,052 | 44,407 | 242,47 | 8,133 |
| 70 | 7,052 | 55,815 | 383,04 | 8,133 |
| $\Sigma\bar{X}=50,429$ | $\Sigma\bar{Y}=4,200$ | $\Sigma=232,113$ | $\Sigma=1441,43$ | $\Sigma=38,721$ |

Fuente: Autores

Los estimadores para el ajuste y cálculo del modelo se calculan de la siguiente manera:

$$a = \frac{\sum(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sum(X_i - \bar{X})^2} = \frac{232,113}{1441,43} \gg a = 0,161$$

$$b = \bar{Y} - (a)(\bar{X})$$

$$b = 4,200 - (0,161)(50,429) \gg b = -3,9204$$

Sustituyendo los valores calculados en la ecuación característica se tiene los siguientes datos:

$$y = 0,161x - 3,9204$$

Para determinar el grado de ajuste del modelo, se calcula el coeficiente de determinación, de la siguiente manera:

$$r = \frac{\sum(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum(X_i - \bar{X})^2 \sum(Y_i - \bar{Y})^2}}$$

$$r = \frac{232,113}{\sqrt{(1441,43)(38,721)}} \gg r = 0,9653$$

Se observa que el grado de ajuste $r = 0,9653$ del modelo es alto, indicando alta confiabilidad para obtener el valor, que será la tolerancia de desalineación angular para esta velocidad.

5.1.2.5 Tolerancia de desalineación

$$0,71 = 0,161(x) + 0$$

$$x = \frac{0,71}{0,161} \gg x = 4,41$$

El valor de x es nuestro estándar de tolerancia, significa que en desalineación angular a una velocidad de 600 rpm, es admisible hasta 4,41 mrad de tolerancia.

5.1.2.6 Consumo energético

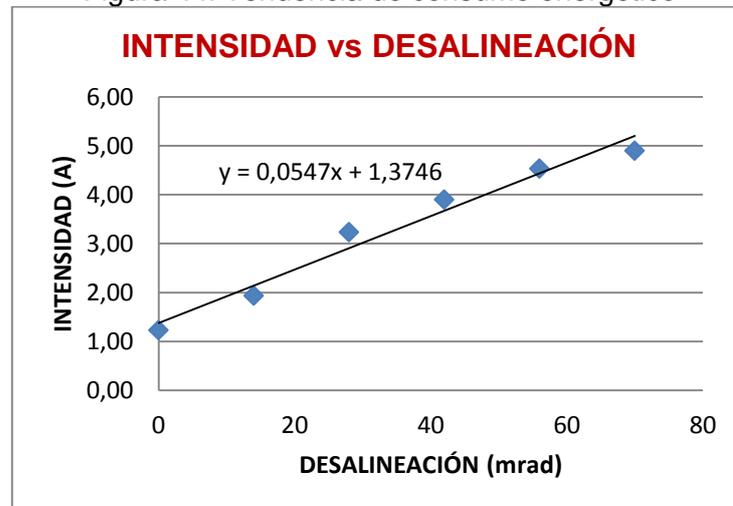
Tabla 13. Desalineación vs Corriente

| Desalineación Angular [mrad] | Intensidad I [A] | Intensidad II [A] | Intensidad III [A] | Intensidad Equivalente [A] | Voltaje [V] |
|------------------------------|------------------|-------------------|--------------------|----------------------------|-------------|
| 0 | 1,5 | 1,5 | 0,7 | 1,23 | 210 |
| 14 | 0,9 | 2,5 | 2,4 | 1,93 | 210 |
| 28 | 2,8 | 3,3 | 3,6 | 3,23 | 210 |
| 42 | 3,0 | 4,4 | 4,3 | 3,90 | 210 |
| 56 | 3,3 | 5,2 | 5,1 | 4,53 | 210 |
| 70 | 3,3 | 6,0 | 5,4 | 4,90 | 210 |

Fuente: Autores

Con los datos obtenidos en la Tabla 16 se construye una gráfica de dispersión (ver Figura 44), donde se determina que el amperaje es directamente proporcional a la desalineación, afirmando que la desalineación está asociada a un incremento del consumo eléctrico.

Figura 44. Tendencia de consumo energético



Fuente: Autores

Tabla 14. Trabajo de motor

| Trabajo [%] | Potencia [kW] | Consumo anual[kW] | Costo [USD] |
|-------------|---------------|-------------------|-------------|
| 9 | 0,36 | 3139 | 251 |
| 14 | 0,57 | 4921 | 394 |
| 23 | 0,95 | 8231 | 658 |
| 28 | 1,15 | 9928 | 794 |
| 32 | 1,34 | 11540 | 923 |
| 35 | 1,44 | 12473 | 998 |

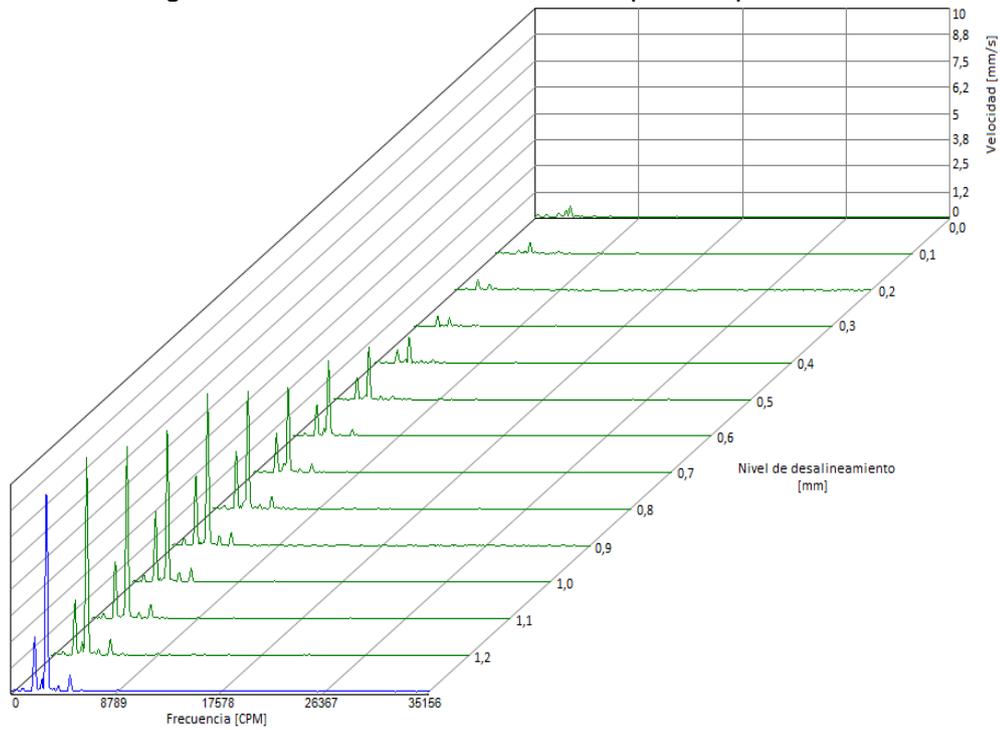
Fuente: Autores

5.2 Desalineación del motor a 1000rpm

5.2.1 Desalineación paralela

5.2.1.1 Gráfica de evolución de espectros

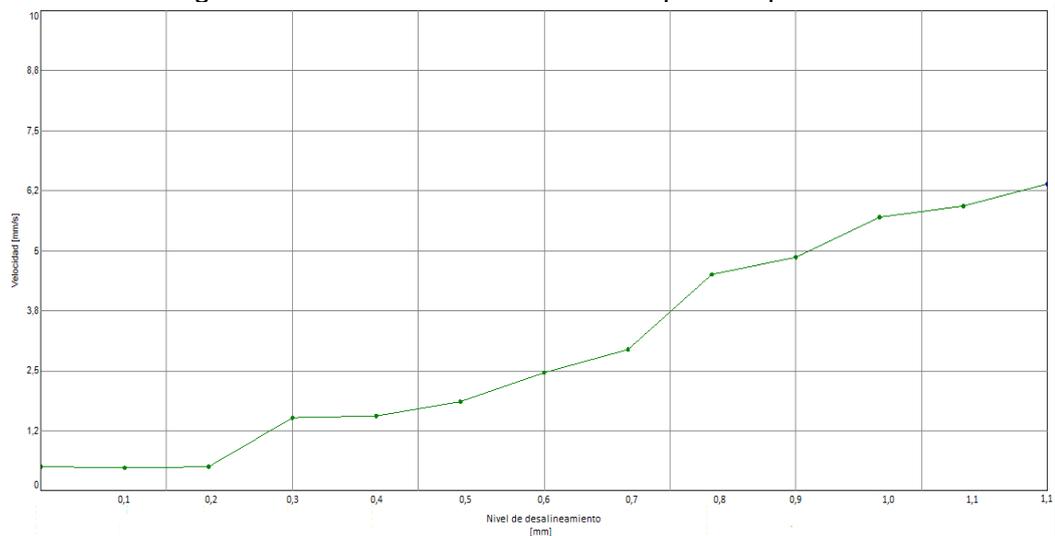
Figura 45. Gráfica de evolución de espectros punto MV



Fuente: Autores

5.2.1.2 Gráfica de tendencia de espectros

Figura 46. Gráfica de tendencia de espectros punto MV



Fuente: Autores

5.2.1.3 *Tabla de desalineación vs vibración.* A continuación se presenta una recopilación de datos de desalineación y vibraciones.

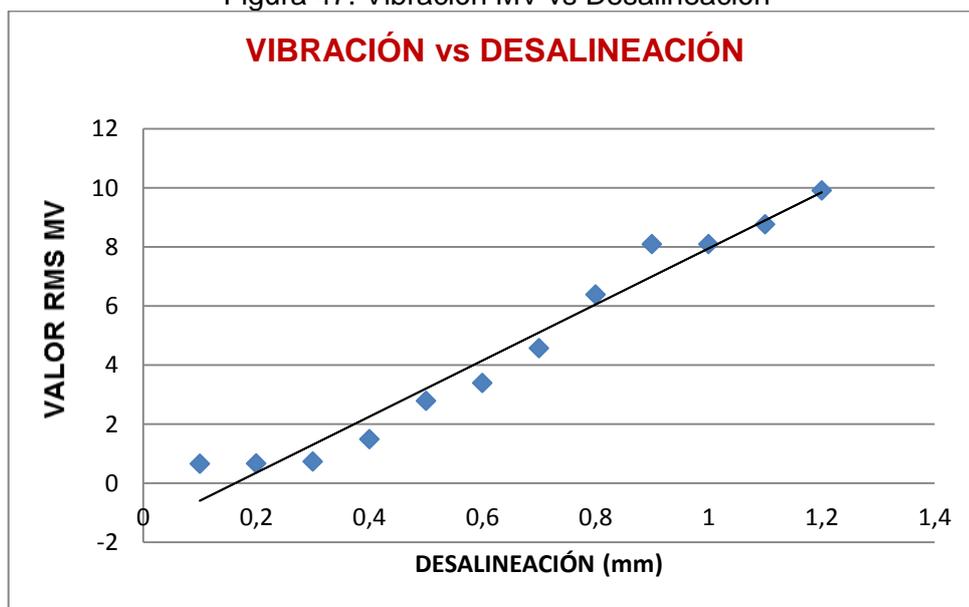
Tabla 15. Tabla de datos de desalineación paralela a 1000 rpm

| N° Medidas | Desalineación [mm] | Valores RMS | |
|------------|--------------------|-------------|-------|
| | | MV | MA |
| 1 | 0,1 | 0,658 | 0,461 |
| 2 | 0,2 | 0,661 | 0,485 |
| 3 | 0,3 | 0,727 | 1,505 |
| 4 | 0,4 | 1,482 | 1,542 |
| 5 | 0,5 | 2,78 | 1,941 |
| 6 | 0,6 | 3,386 | 3,144 |
| 7 | 0,7 | 4,57 | 2,926 |
| 8 | 0,8 | 6,387 | 4,491 |
| 9 | 0,9 | 8,093 | 4,848 |
| 10 | 1,0 | 8,093 | 5,683 |
| 11 | 1,1 | 8,765 | 5,916 |
| 12 | 1,2 | 9,907 | 6,375 |

Fuente: Autores

Con los valores obtenidos se realiza un gráfico: vibración MV vs desalineación con el fin de observar los efectos de la desalineación paralela, ver Figura 47.

Figura 47. Vibración MV vs Desalineación



Fuente: Autores

5.2.1.4 *Regresión lineal.* Se presentan datos de regresión lineal.

Tabla 16. Datos de regresión

| X_i | Y_i | $(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})$ | $(X_i - \bar{X})^2$ | $(Y_i - \bar{Y})^2$ |
|---|--|-------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|
| 0,1 | 0,658 | 2,182 | 0,303 | 15,743 |
| 0,2 | 0,661 | 1,784 | 0,203 | 15,719 |
| 0,3 | 0,727 | 1,365 | 0,123 | 15,200 |
| 0,4 | 1,482 | 0,786 | 0,063 | 9,883 |
| 0,5 | 2,780 | 0,277 | 0,023 | 3,407 |
| 0,6 | 3,386 | 0,062 | 0,003 | 1,537 |
| 0,7 | 4,570 | -0,003 | 0,002 | 0,003 |
| 0,8 | 6,387 | 0,264 | 0,023 | 3,102 |
| 0,9 | 8,093 | 0,867 | 0,063 | 12,022 |
| 1 | 8,093 | 1,214 | 0,123 | 12,022 |
| 1,1 | 8,765 | 1,863 | 0,203 | 17,133 |
| 1,2 | 9,907 | 2,905 | 0,303 | 27,892 |
| $\Sigma \bar{X} = 0,65$ | $\Sigma \bar{Y} = 4,626$ | $\Sigma = 13,565$ | $\Sigma = 1,430$ | $\Sigma = 133,663$ |

Fuente: Autores

Los estimadores para el ajuste del modelo se calculan de la siguiente manera:

$$a = \frac{\sum(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sum(X_i - \bar{X})^2} = \frac{13,565}{1,430} = 9,486$$

$$b = \bar{Y} - (a)(\bar{X})$$

$$b = 4,626 - (9,486)(0,65) = -1,5401$$

Sustituyendo los valores calculados en la ecuación característica se tiene:

$$y = 9,4589x - 1,5401$$

Para determinar el grado de ajuste del modelo, se calcula el coeficiente de determinación, de la siguiente manera:

$$r = \frac{\sum(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum(X_i - \bar{X})^2 \sum(Y_i - \bar{Y})^2}} = \frac{13,565}{\sqrt{(1,430)(133,663)}} = 0,963$$

Se observa que el grado de ajuste $r = 0,963$ del modelo es alto, indicando alta confiabilidad para obtener el valor, que será la tolerancia de desalineación paralela para esta velocidad.

5.2.1.5 Tolerancia de desalineación

$$0,71 = 9,4589(x) + 0 \quad x = 0,0748$$

El valor de x es nuestro estándar de tolerancia, significa que en desalineación paralela a una velocidad de 1000 rpm, es admisible hasta 0,075 mm de desalineación.

5.2.1.6 Consumo energético. El consumo energético se detalla en la tabla 17.

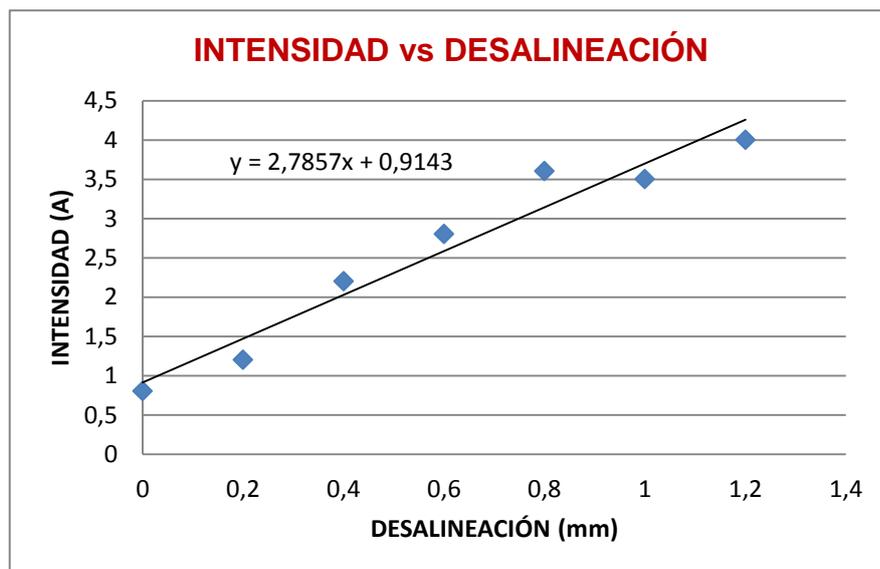
Tabla 17. Desalineación vs Corriente

| Desalineación Paralela [mm] | Intensidad I [A] | Intensidad II [A] | Intensidad III [A] | Intensidad Equivalente[A] | Voltaje [V] |
|-----------------------------|------------------|-------------------|--------------------|---------------------------|-------------|
| 0,0 | 1,5 | 1,5 | 0,8 | 1,27 | 210 |
| 0,2 | 1,8 | 2,0 | 1,2 | 1,67 | 210 |
| 0,4 | 2,3 | 1,9 | 2,2 | 2,13 | 210 |
| 0,6 | 2,6 | 3,5 | 2,8 | 2,97 | 210 |
| 0,8 | 2,8 | 3,9 | 3,6 | 3,43 | 210 |
| 1,0 | 3,0 | 4,1 | 3,5 | 3,53 | 210 |
| 1,2 | 3,3 | 4,2 | 4,0 | 3,83 | 210 |

Fuente: Autores

Con los datos obtenidos en la Tabla 20 se construye una gráfica (ver Figura 48), donde se determina que el amperaje es directamente proporcional a la desalineación, afirmando que la desalineación está asociada a un incremento del consumo eléctrico.

Figura 48. Gráfico de tendencia de consumo energético



Fuente: Autores

Tabla 18. Trabajo de motor

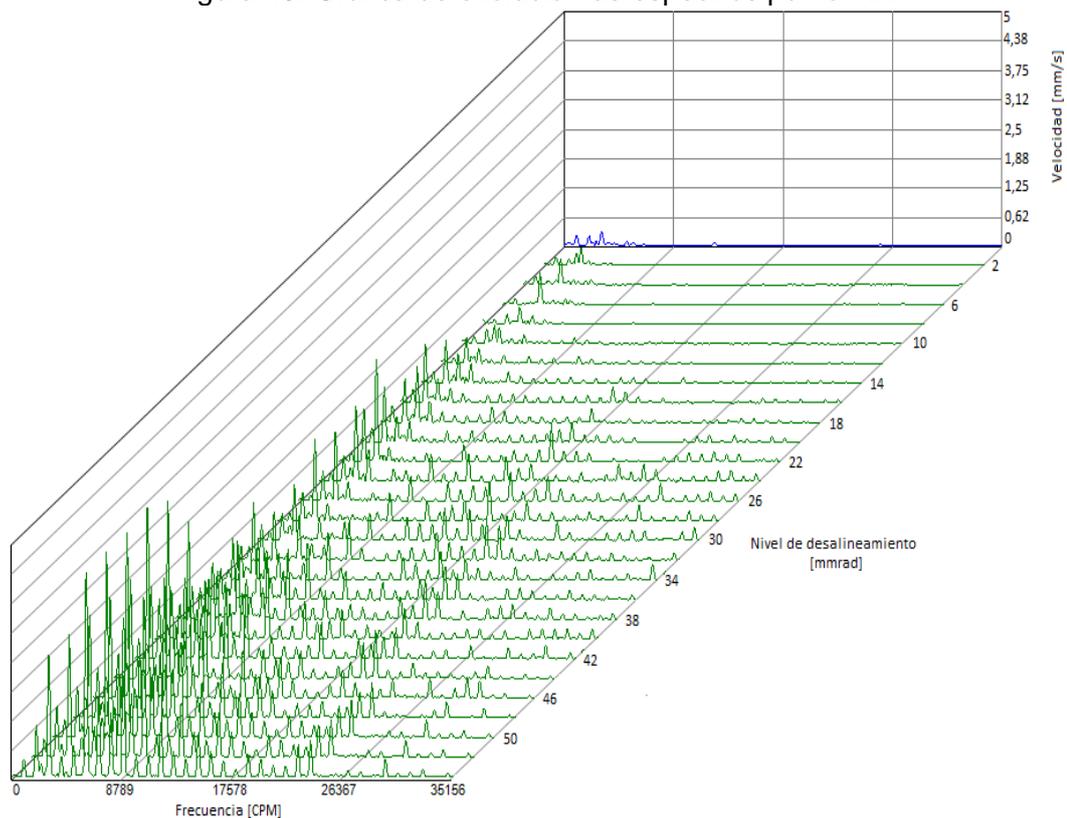
| Trabajo [%] | Potencia [kW] | Consumo anual[kW] | Costo [USD] |
|-------------|---------------|-------------------|-------------|
| 9 | 0,39 | 3378 | 338 |
| 12 | 0,51 | 4445 | 444 |
| 15 | 0,66 | 5689 | 569 |
| 21 | 0,92 | 7911 | 791 |
| 25 | 1,06 | 9156 | 916 |
| 25 | 1,09 | 9423 | 942 |
| 27 | 1,18 | 10223 | 1022 |

Fuente: Autores

5.2.2 Desalineación angular

5.2.2.1 Gráfica de evolución de espectros punto MA

Figura 49. Gráfica de evolución de espectros punto MA

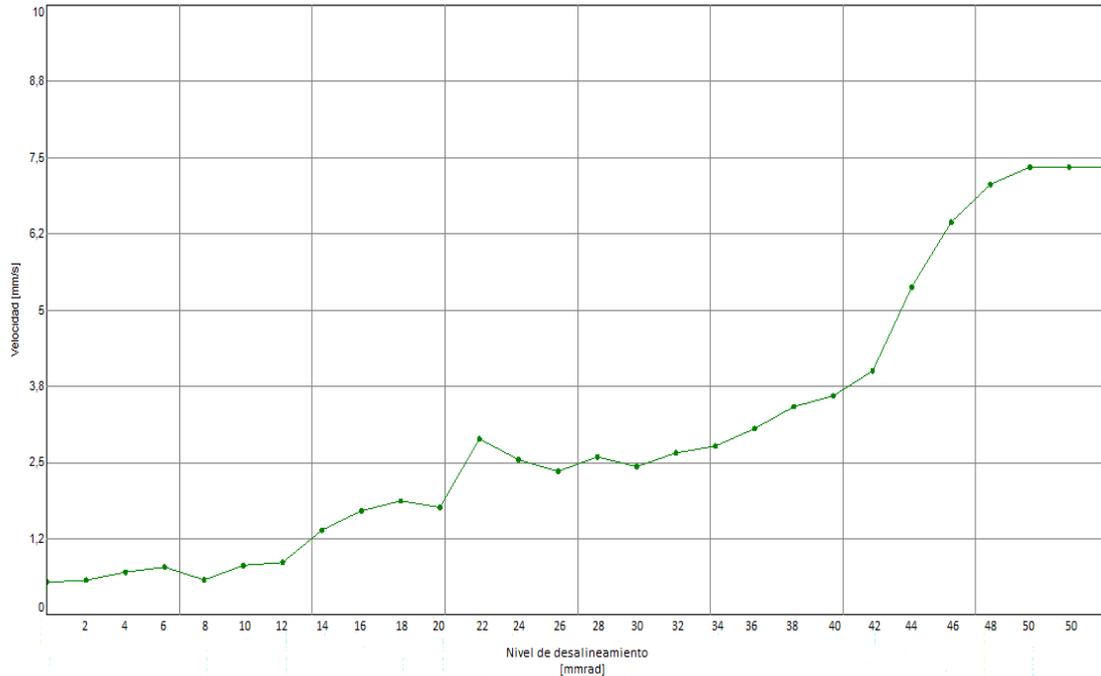


Fuente: Autores

En la figura número 49 se puede observar la evolución de los espectros que se desarrollan en el punto MA.

5.2.2.2 Gráfica de tendencia de espectros

Figura 50. Gráfica de tendencia de espectros punto MA



Fuente: Autores

5.2.2.3 *Tabla de desalineación vs vibración.* En la Tabla 19 se muestra una porción de los datos medidos los cuales son usados para la construcción de la Figura 51, el resto de los datos se pueden ver en el Anexo I. Se empleó este conjunto de datos porque simula el comportamiento del incremento de la desalineación angular, resaltando el resto de los datos se fueron influenciados en mayor medida por factores no controlados como la frecuencia natural de la estructura.

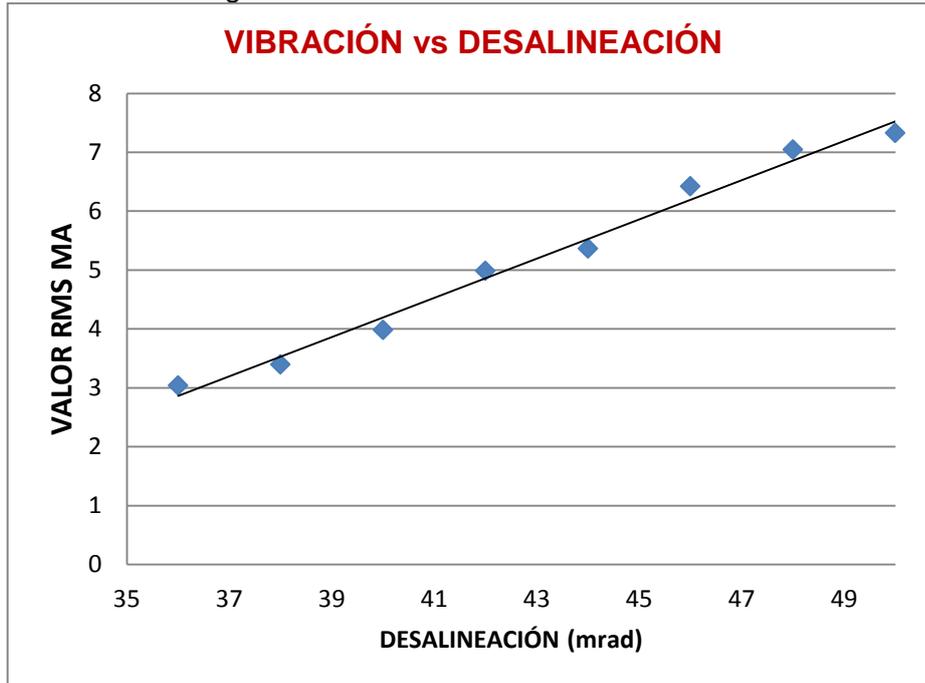
Tabla 19. Datos de desalineación angular a 1000 rpm

| N° Medidas | Desalineación [mrad] | Valores RMS | |
|------------|----------------------|-------------|-------|
| | | MV | MA |
| 1 | 36 | 3,741 | 3,040 |
| 2 | 38 | 3,578 | 3,400 |
| 3 | 40 | 3,871 | 3,985 |
| 4 | 42 | 4,396 | 4,985 |
| 5 | 44 | 4,293 | 5,365 |
| 6 | 46 | 5,959 | 6,423 |
| 7 | 48 | 6,523 | 7,045 |
| 8 | 50 | 7,125 | 7,327 |

Fuente: Autores

Con los valores obtenidos se realiza un gráfico: vibración MA vs desalineación con el fin de observar los efectos de la desalineación angular, ver Figura 51.

Figura 51. Vibración MA vs Desalineación



Fuente: Autores

5.2.2.4 Regresión lineal

Tabla 20. Datos de regresión

| X_i | Y_i | $(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})$ | $(X_i - \bar{X})^2$ | $(Y_i - \bar{Y})^2$ |
|-----------------------|--------------------------|----------------------------------|---------------------|---------------------|
| 36 | 3,04 | 15,093 | 49 | 4,649 |
| 38 | 3,4 | 8,981 | 25 | 3,226 |
| 40 | 3,985 | 3,633 | 9 | 1,467 |
| 42 | 4,985 | 0,211 | 1 | 0,044 |
| 44 | 5,365 | 0,168 | 1 | 0,028 |
| 46 | 6,423 | 3,680 | 9 | 1,504 |
| 48 | 7,045 | 9,243 | 25 | 3,417 |
| 50 | 7,327 | 14,915 | 49 | 4,540 |
| $\Sigma \bar{X} = 43$ | $\Sigma \bar{Y} = 5,196$ | $\Sigma = 55,928$ | $\Sigma = 168$ | $\Sigma = 18,879$ |

Fuente. Autores

Los estimadores para el ajuste del modelo se calculan de la siguiente manera:

$$a = \frac{\Sigma(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\Sigma(X_i - \bar{X})^2} = \frac{55,928}{168} = 0,333$$

$$b = \bar{Y} - (a)(\bar{X})$$

$$b = 5,196 - (0,333)(43) = -9,119$$

Sustituyendo los valores calculados en la ecuación característica se tiene:

$$y = 0,333x - 0,9119$$

Para determinar el grado de ajuste del modelo, se calcula el coeficiente de determinación, de la siguiente manera:

$$r = \frac{\sum(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum(X_i - \bar{X})^2 \sum(Y_i - \bar{Y})^2}} = \frac{55,928}{\sqrt{(168)(18,879)}} = 0,986$$

Se observa que el grado de ajuste $r = 0,9862$ del modelo es alto, indicando alta confiabilidad para obtener el valor, que será la tolerancia de desalineación angular para esta velocidad.

5.2.2.5 Tolerancia de desalineación

$$0,71 = 0,333(x) + 0 \quad x = 2,132$$

El valor de x es nuestro estándar de tolerancia, significa que en desalineación angular a una velocidad de 1000 rpm, es admisible hasta 2,13 mrad de desalineación.

5.2.2.6 Consumo energético

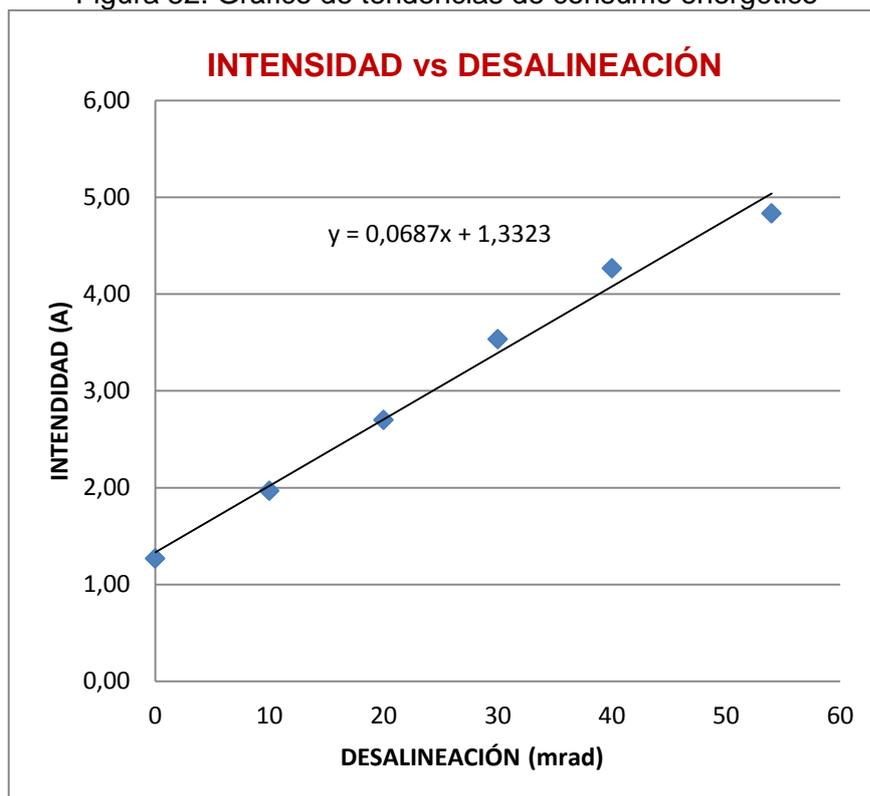
Tabla 21. Desalineación vs Corriente

| Desalineación Angular [mrad] | Intensidad I [A] | Intensidad II [A] | Intensidad III [A] | Intensidad Equivalente [A] | Voltaje [V] |
|------------------------------|------------------|-------------------|--------------------|----------------------------|-------------|
| 0 | 1,5 | 1,5 | 0,8 | 1,27 | 210 |
| 10 | 2,1 | 2,0 | 1,8 | 1,97 | 210 |
| 20 | 2,5 | 2,8 | 2,8 | 2,70 | 210 |
| 30 | 3,1 | 3,6 | 3,9 | 3,53 | 210 |
| 40 | 3,4 | 4,7 | 4,7 | 4,27 | 210 |
| 54 | 3,5 | 5,8 | 5,2 | 4,83 | 210 |

Fuente. Autores

Con los datos obtenidos en la Tabla 20 se construye una gráfica (ver Figura 52), donde se determina que el amperaje es directamente proporcional a la desalineación, afirmando que la desalineación está asociada a un incremento del consumo eléctrico.

Figura 52. Gráfico de tendencias de consumo energético



Fuente: Autores

En la tabla número 24 se observa el trabajo realizado por el motor y el costo que representa hacerlo funcionar a diferentes porcentajes.

Tabla 22. Trabajo de motor

| Trabajo [%] | Potencia [kW] | Consumo anual[kW] | Costo [USD] |
|-------------|---------------|-------------------|-------------|
| 9 | 0,37 | 3224 | 258 |
| 14 | 0,58 | 5006 | 400 |
| 19 | 0,80 | 6873 | 550 |
| 25 | 1,04 | 8994 | 720 |
| 30 | 1,26 | 10861 | 869 |
| 35 | 1,42 | 12303 | 984 |

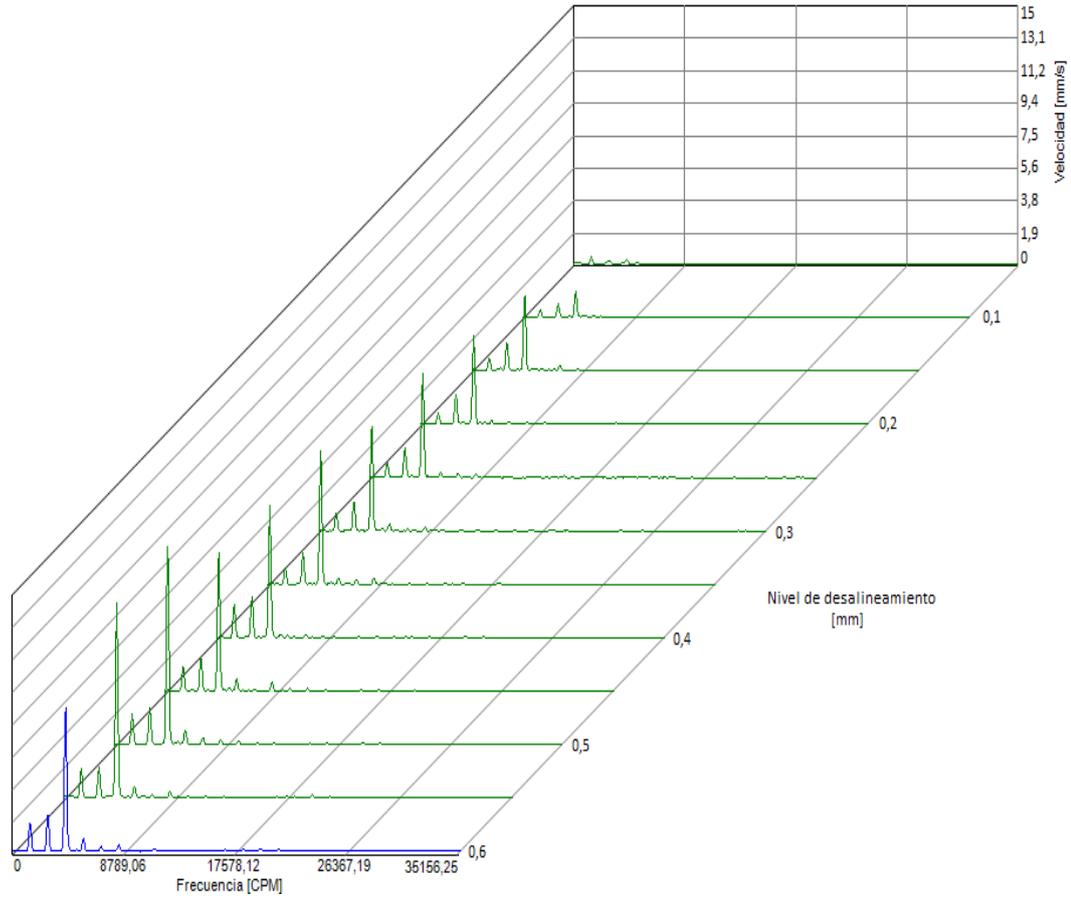
Fuente: Autores

5.3 Desalineación del motor a 1400 rpm

5.3.1 Desalineación paralela

5.3.1.1 *Gráfica de evolución de espectros.* En la gráfica número 53 se puede observar la evolución de los espectros de vibraciones.

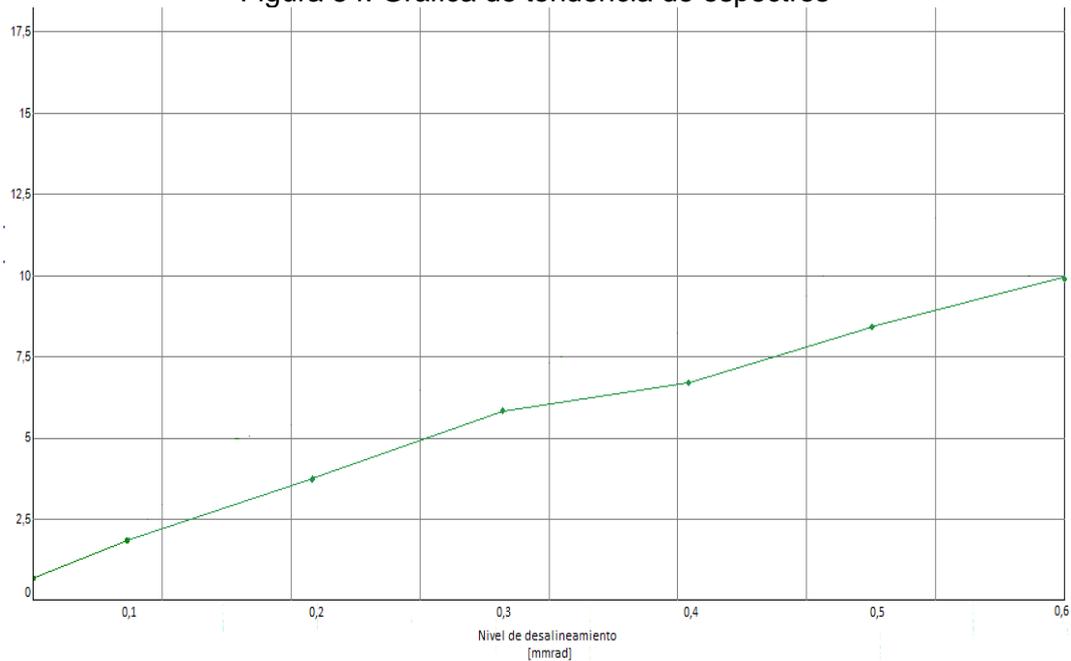
Figura 53. Gráfica de evolución de espectros punto MV



Fuente: Autores

5.3.1.2 Gráfica de tendencia de espectros

Figura 54. Gráfica de tendencia de espectros



Fuente: Autores

5.3.1.3 Tabla de desalineación vs vibración

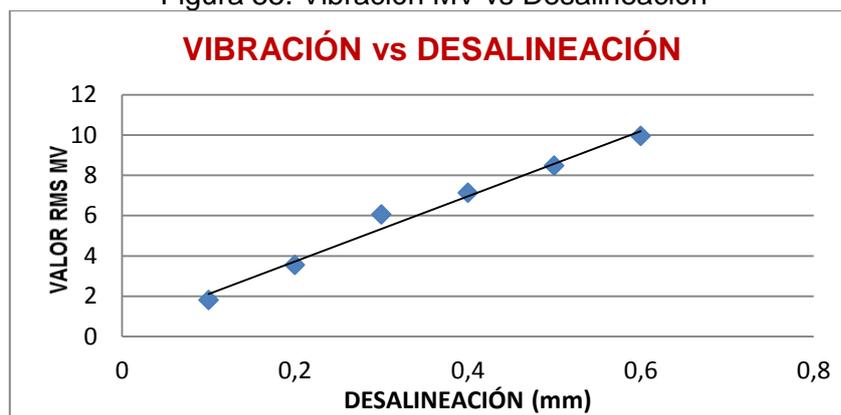
Tabla 23. Datos de desalineación paralela a 1400 rpm

| N° Medidas | Desalineación [mm] | Valores RMS | |
|------------|--------------------|-------------|-------|
| | | MV | MA |
| 1 | 0,1 | 1,805 | 2,249 |
| 2 | 0,2 | 3,535 | 4,677 |
| 3 | 0,3 | 6,049 | 5,054 |
| 4 | 0,4 | 7,117 | 5,578 |
| 5 | 0,5 | 8,468 | 5,829 |
| 6 | 0,6 | 9,948 | 5,808 |

Fuente: Autores

Con los valores obtenidos se realiza un gráfico: vibración MV vs desalineación con el fin de observar los efectos de la desalineación paralela, ver Figura 55.

Figura 55. Vibración MV vs Desalineación



Fuente: Autores

5.3.1.4 Regresión lineal

Tabla 24. Datos de regresión

| X_i | Y_i | $(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})$ | $(X_i - \bar{X})^2$ | $(Y_i - \bar{Y})^2$ |
|-------------------------|--------------------------|----------------------------------|---------------------|---------------------|
| 0,1 | 1,805 | 1,087 | 0,063 | 18,911 |
| 0,2 | 3,535 | 0,393 | 0,023 | 6,857 |
| 0,3 | 6,049 | 0,005 | 0,003 | 0,011 |
| 0,4 | 7,117 | 0,048 | 0,003 | 0,928 |
| 0,5 | 8,468 | 0,347 | 0,023 | 5,356 |
| 0,6 | 9,948 | 0,949 | 0,063 | 14,397 |
| $\Sigma \bar{X} = 0,35$ | $\Sigma \bar{Y} = 6,154$ | $\Sigma = 2,829$ | $\Sigma = 0,175$ | $\Sigma = 46,460$ |

Fuente: Autores

Los estimadores para el ajuste del modelo se calculan de la siguiente manera:

$$a = \frac{\sum(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sum(X_i - \bar{X})^2} = \frac{2,829}{0,175} = 16,166$$

$$b = \bar{Y} - (a)(\bar{X})$$

$$b = 6,154 - (16,166)(0,35) = 0,496$$

Sustituyendo los valores calculados en la ecuación característica se tiene:

$$y = 16,166x + 0,4955$$

Para determinar el grado de ajuste del modelo, se calcula el coeficiente de determinación, de la siguiente manera:

$$r = \frac{\sum(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum(X_i - \bar{X})^2 \sum(Y_i - \bar{Y})^2}}$$

$$r = \frac{2,829}{\sqrt{(0,175)(46,460)}} = 0,984$$

Se observa que el grado de ajuste $r = 0,9844$ del modelo es alto, indicando alta confiabilidad para obtener el valor, que será la tolerancia de desalineación paralela para esta velocidad.

5.3.1.5 Tolerancia de desalineación

$$0,71 = 16,166(x) + 0$$

$$x = 0,0439$$

El valor de x es nuestro estándar de tolerancia, significa que en desalineación paralela a una velocidad de 1400 rpm, es admisible hasta 0,044 mm de desalineación.

5.3.1.6 Consumo energético. El consumo energético se puede apreciar en la tabla número 25, presentada a continuación.

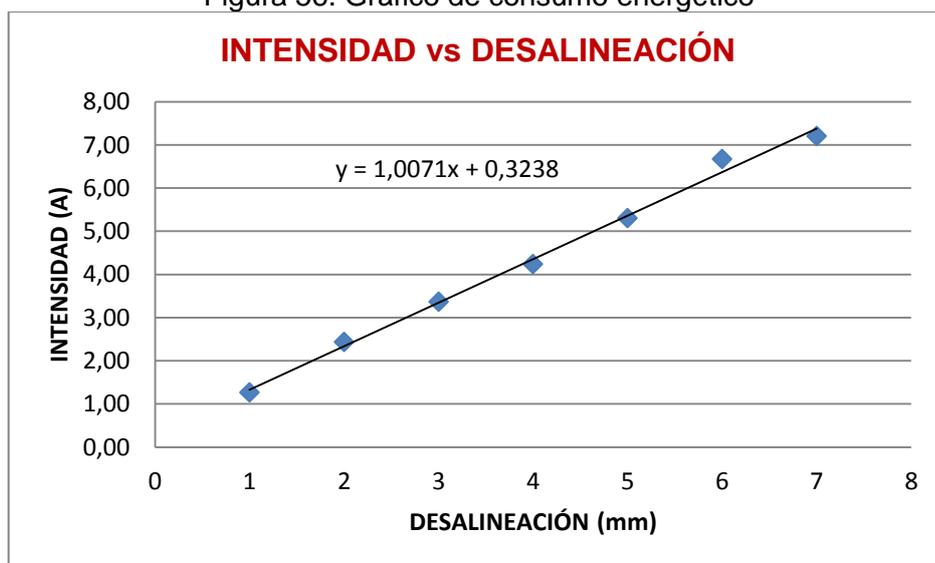
Tabla 25. Desalineación vs Corriente

| Desalineación Paralelo [mm] | Intensidad I [A] | Intensidad II [A] | Intensidad III [A] | Intensidad Equivalente [A] | Voltaje [V] |
|-----------------------------|------------------|-------------------|--------------------|----------------------------|-------------|
| 0,0 | 1,5 | 1,5 | 0,8 | 1,27 | 210 |
| 0,1 | 1,9 | 2,6 | 2,8 | 2,43 | 210 |
| 0,2 | 2,6 | 3,9 | 3,6 | 3,37 | 210 |
| 0,3 | 3,0 | 4,9 | 4,8 | 4,23 | 210 |
| 0,4 | 3,9 | 6,1 | 5,9 | 5,30 | 210 |
| 0,5 | 5,5 | 7,7 | 6,8 | 6,67 | 210 |
| 0,6 | 6,1 | 8,0 | 7,5 | 7,20 | 210 |

Fuente: Autores

Con los datos obtenidos en la Tabla 28 se construye una gráfica (ver Figura 56), donde se determina que el amperaje es directamente proporcional a la desalineación, afirmando que la desalineación está asociada a un incremento del consumo eléctrico.

Figura 56. Gráfico de consumo energético



Fuente: Autores

Tabla 26. Trabajo de motor

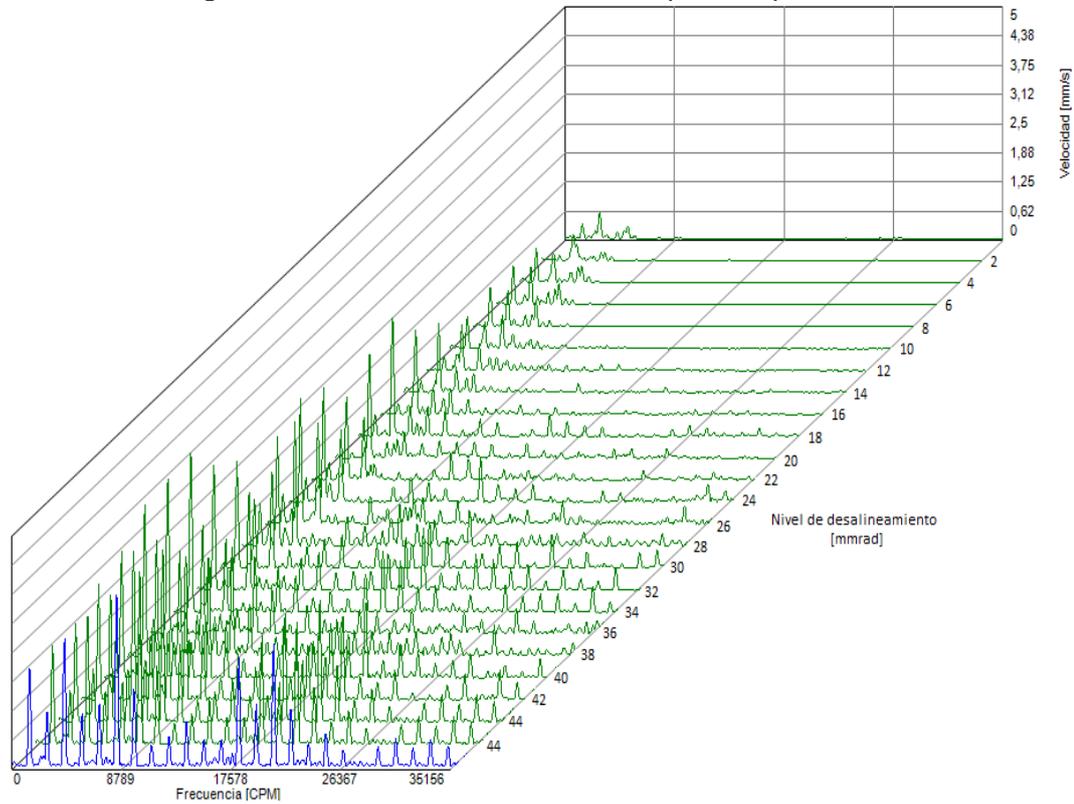
| Trabajo [%] | Potencia [kW] | Consumo anual[kW] | Costo [USD] |
|-------------|---------------|-------------------|-------------|
| 9 | 0,39 | 3378 | 338 |
| 17 | 0,75 | 6489 | 649 |
| 24 | 1,04 | 8978 | 898 |
| 30 | 1,31 | 11289 | 1129 |
| 38 | 1,64 | 14134 | 1413 |
| 48 | 2,06 | 17778 | 1778 |
| 51 | 2,22 | 19201 | 1920 |

Fuente: Autores

5.3.2 Desalineación angular

5.3.2.1 *Gráfica de evolución de espectros.* A continuación se presenta la gráfica de los espectros de las vibraciones.

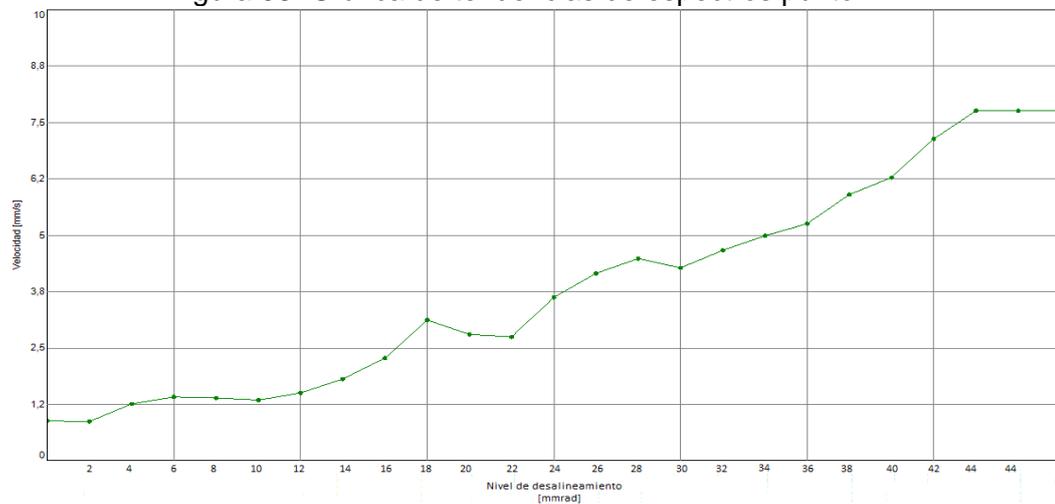
Figura 57. Gráfica de evolución de espectros punto MA



Fuente: Autores

5.3.2.2 *Gráfica de tendencia de espectros*

Figura 58. Gráfica de tendencias de espectros punto MA



Fuente: Autores

5.3.2.3 *Tabla de desalineación vs vibración.* En la Tabla 27 se muestra una porción de los datos medidos los cuales son usados para la construcción de la Figura 59, el resto de los datos se pueden ver en el Anexo I. Se empleó este conjunto de datos porque simula el comportamiento del incremento de la desalineación angular, resaltando el resto de los datos se fueron influenciados en mayor medida por factores no controlados como la frecuencia natural de la estructura.

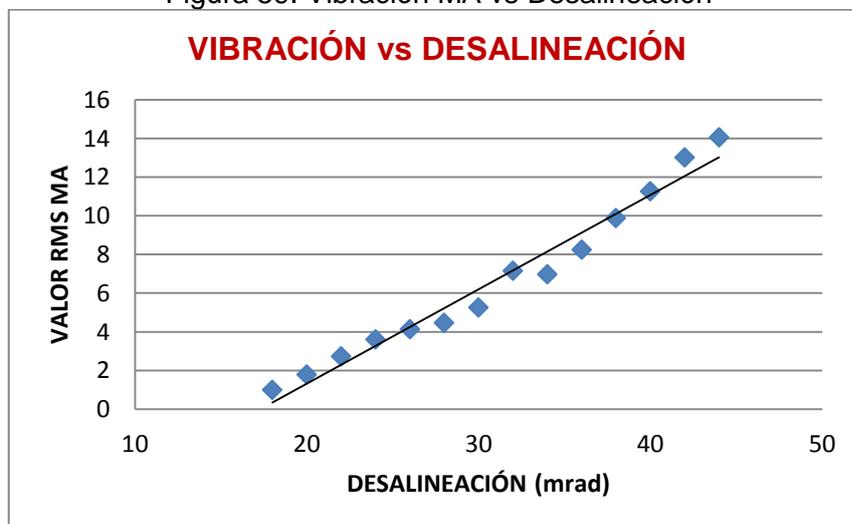
Tabla 27. Datos de desalineación paralela a 1400 rpm

| N° Medidas | Desalineación [mrad] | Valores RMS | |
|------------|----------------------|-------------|--------|
| | | MV | MA |
| 1 | 18 | 2,054 | 1,003 |
| 2 | 20 | 2,284 | 1,783 |
| 3 | 22 | 3,062 | 2,729 |
| 4 | 24 | 3,240 | 3,604 |
| 5 | 26 | 3,842 | 4,139 |
| 6 | 28 | 4,104 | 4,467 |
| 7 | 30 | 4,925 | 5,260 |
| 8 | 32 | 4,609 | 7,149 |
| 9 | 34 | 5,288 | 6,970 |
| 10 | 36 | 4,708 | 8,239 |
| 11 | 38 | 5,073 | 9,886 |
| 12 | 40 | 5,853 | 11,263 |

Fuente: Autores

Con los valores obtenidos se realiza un gráfico: vibración MA vs desalineación con el fin de observar los efectos de la desalineación angular, ver Figura 59.

Figura 59. Vibración MA vs Desalineación



Fuente: Autores

5.3.2.4 Regresión lineal

Tabla 28. Datos de regresión

| X_i | Y_i | $(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})$ | $(X_i - \bar{X})^2$ | $(Y_i - \bar{Y})^2$ |
|---|--|--------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|
| 18 | 1,003 | 73,837 | 169 | 32,259 |
| 20 | 1,783 | 53,897 | 121 | 24,007 |
| 22 | 2,729 | 35,584 | 81 | 15,632 |
| 24 | 3,604 | 21,551 | 49 | 9,478 |
| 26 | 4,139 | 12,718 | 25 | 6,471 |
| 28 | 4,467 | 6,647 | 9 | 4,909 |
| 30 | 5,260 | 1,428 | 1 | 2,024 |
| 32 | 7,149 | 0,466 | 1 | 0,217 |
| 34 | 6,970 | 0,861 | 9 | 0,082 |
| 36 | 8,239 | 7,781 | 25 | 2,422 |
| 38 | 9,886 | 22,422 | 49 | 10,260 |
| 40 | 11,263 | 41,221 | 81 | 20,978 |
| 42 | 13,018 | 69,687 | 121 | 40,135 |
| 44 | 14,049 | 95,760 | 169 | 54,261 |
| $\Sigma \bar{X} = 31$ | $\Sigma \bar{Y} = 6,683$ | $\Sigma = 443,861$ | $\Sigma = 910$ | $\Sigma = 223,141$ |

Fuente: Autores

Los estimadores para el ajuste del modelo se calculan de la siguiente manera:

$$a = \frac{\sum(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sum(X_i - \bar{X})^2} = \frac{443,861}{910} = 0,488$$

$$b = \bar{Y} - (a)(\bar{X}) = 6,683 - (0,488)(31) = 8,438$$

Sustituyendo los valores calculados en la ecuación característica se tiene:

$$y = ax + b = 0,488 + 8,438$$

Para determinar el grado de ajuste del modelo, se calcula el coeficiente de determinación, de la siguiente manera:

$$r = \frac{\sum(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum(X_i - \bar{X})^2 \sum(Y_i - \bar{Y})^2}}$$

$$r = \frac{443,861}{\sqrt{(910)(223,141)}} = 0,970$$

Se observa que el grado de ajuste $r = 0,970$ del modelo es alto, indicando alta confiabilidad para obtener el valor, que será la tolerancia de desalineación angular para esta velocidad.

5.3.2.5 Tolerancia de desalineación

$$0,71 = 0,488(x) + 0 \quad x = 1,46$$

El valor de x es nuestro estándar de tolerancia, significa que en desalineación angular a una velocidad de 1400 rpm, es admisible hasta 1,46 mrad de desalineación.

5.3.2.6 Consumo energético

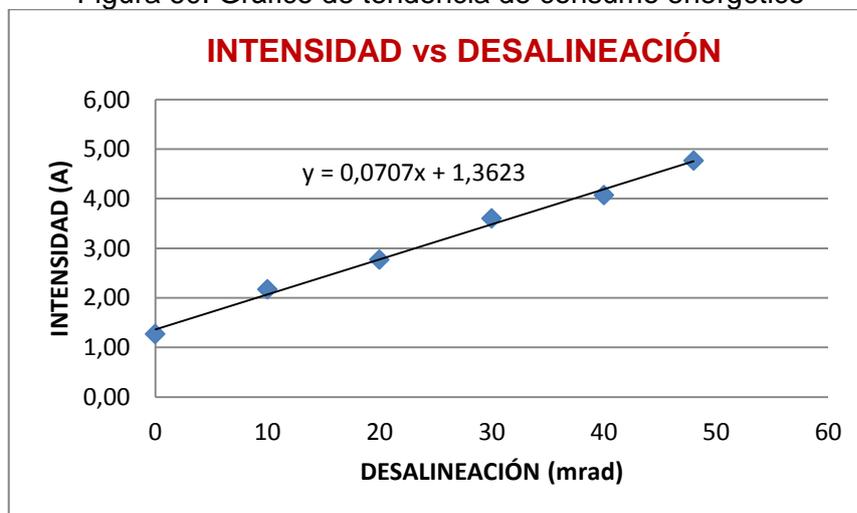
Tabla 29. Desalineación vs Corriente

| Desalineación Angular [mrad] | Intensidad I [A] | Intensidad II [A] | Intensidad III [A] | Intensidad Equivalente [A] | Voltaje [V] |
|------------------------------|------------------|-------------------|--------------------|----------------------------|-------------|
| 0 | 1,5 | 1,5 | 0,8 | 1,27 | 210 |
| 10 | 2,2 | 2,6 | 1,7 | 2,17 | 210 |
| 20 | 2,9 | 2,9 | 2,5 | 2,77 | 210 |
| 30 | 3,0 | 3,9 | 3,9 | 3,60 | 210 |
| 40 | 3,4 | 4,3 | 4,5 | 4,07 | 210 |

Fuente: Autores

Con los datos obtenidos en la Tabla 29 se construye una gráfica (ver Figura 60), donde se determina que el amperaje es directamente proporcional a la desalineación, afirmando que la desalineación está asociada a un incremento del consumo eléctrico.

Figura 60. Gráfico de tendencia de consumo energético



Fuente: Autores

Tabla 30. Trabajo de motor

| Trabajo [%] | Potencia [kW] | Consumo anual[kW] | Costo [USD] |
|-------------|---------------|-------------------|---------------|
| 9 | 0,37 | 3224 | 257,95 |
| 15 | 0,64 | 5515 | 441,23 |
| 20 | 0,82 | 7043 | 563,41 |
| 26 | 1,06 | 9164 | 733,11 |
| 29 | 1,20 | 10352 | 828,15 |
| 34 | 1,40 | 12134 | 970,70 |

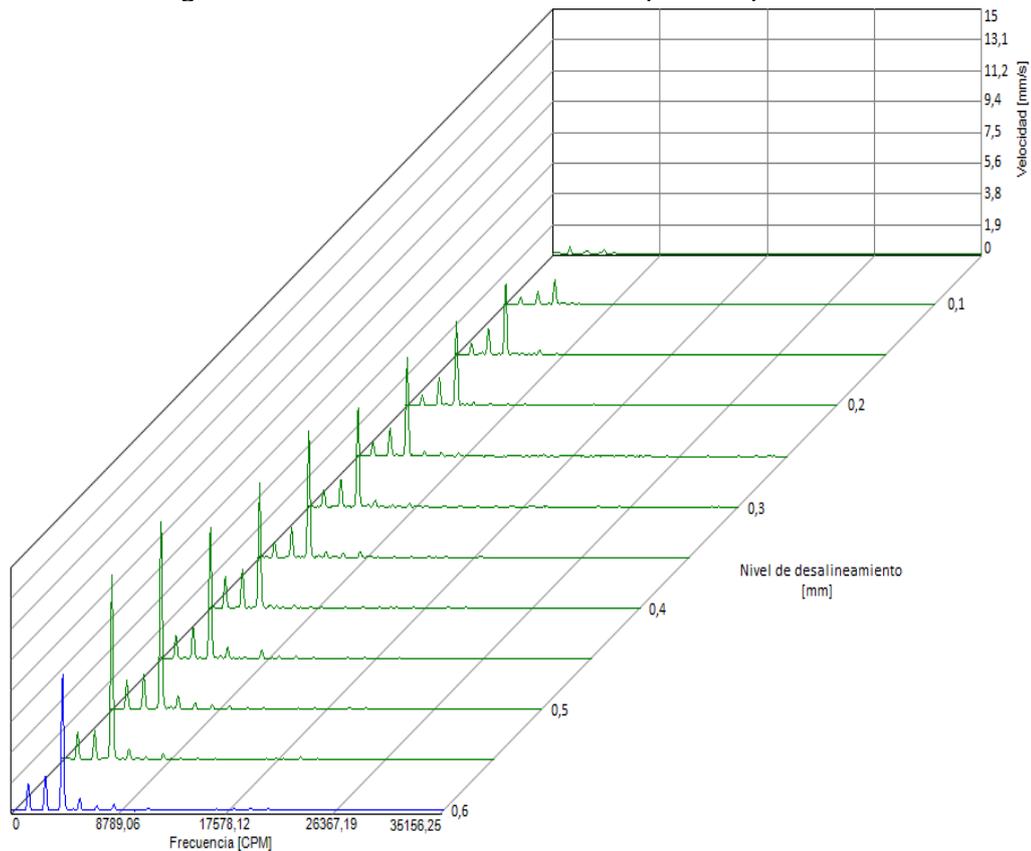
Fuente: Autores

5.4 Desalineación del motor a 1800 rpm

5.4.1 Desalineación paralela

5.4.1.1 *Gráfica de evolución de espectros.* Se muestra la gráfica de espectros de vibración en la figura número 61.

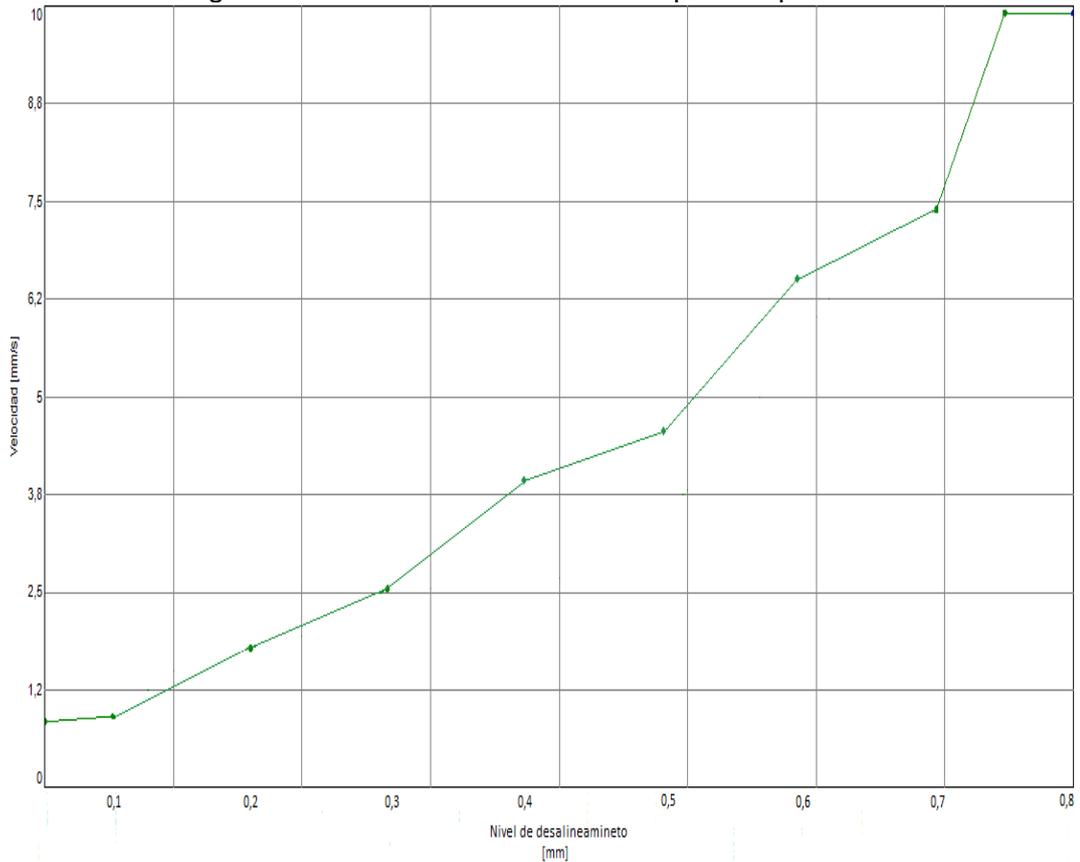
Figura 61. Gráfica de evolución de espectros punto MV



Fuente: Autores

5.4.1.2 *Gráfica de tendencia de espectros*

Figura 62. Gráfica de evolución de espectros punto MV



Fuente: Autores

5.4.1.3 Tabla de desalineación vs vibración

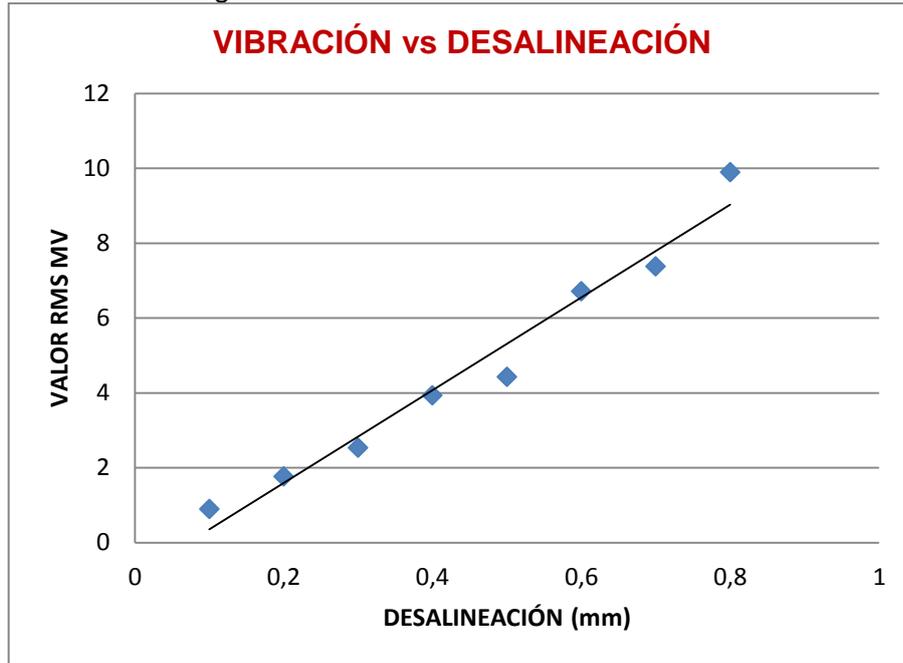
Tabla 31. Datos de desalineación paralela a 1800 rpm

| N° Medidas | Desalineación [mm] | Valores RMS | |
|------------|--------------------|-------------|-------|
| | | MV | MA |
| 1 | 0,1 | 0,897 | 1,172 |
| 2 | 0,2 | 1,768 | 1,754 |
| 3 | 0,3 | 2,530 | 2,654 |
| 4 | 0,4 | 3,928 | 3,008 |
| 5 | 0,5 | 4,425 | 3,091 |
| 6 | 0,6 | 6,710 | 2,897 |
| 7 | 0,7 | 7,377 | 3,237 |
| 8 | 0,8 | 9,893 | 3,256 |

Fuente: Autores

Con los valores obtenidos se realiza un gráfico: vibración MV vs desalineación con el fin de observar los efectos de la desalineación paralela, ver Figura 63 donde se aprecia de mejor manera lo descrito.

Figura 63. Vibración MV vs Desalineación



Fuente: Autores

5.4.1.4 Regresión lineal

Tabla 32. Datos de regresión

| X_i | Y_i | $(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})$ | $(X_i - \bar{X})^2$ | $(Y_i - \bar{Y})^2$ |
|-------------------------|--------------------------|----------------------------------|---------------------|---------------------|
| 0,1 | 0,897 | 1,328 | 0,123 | 14,394 |
| 0,2 | 1,768 | 0,731 | 0,063 | 8,544 |
| 0,3 | 2,53 | 0,324 | 0,023 | 4,67 |
| 0,4 | 3,928 | 0,038 | 0,002 | 0,582 |
| 0,5 | 4,425 | -0,013 | 0,003 | 0,071 |
| 0,6 | 6,71 | 0,303 | 0,023 | 4,076 |
| 0,7 | 7,377 | 0,672 | 0,063 | 7,215 |
| 0,8 | 9,893 | 1,821 | 0,123 | 27,061 |
| $\Sigma \bar{X} = 0,45$ | $\Sigma \bar{Y} = 4,691$ | $\Sigma = 5,204$ | $\Sigma = 0,423$ | $\Sigma = 66,613$ |

Fuente: Autores

Los estimadores para el ajuste del modelo se calculan de la siguiente manera:

$$a = \frac{\sum(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sum(X_i - \bar{X})^2} = \frac{5,204}{0,423} = 12,387$$

$$b = \bar{Y} - (a)(\bar{X})$$

$$b = 4,691 - (12,387)(0,45) = -0,8833$$

Sustituyendo los valores calculados en la ecuación característica se tiene:

$$y = 12,387x + 0,8833$$

Para determinar el grado de ajuste del modelo, se calcula el coeficiente de determinación, de la siguiente manera:

$$r = \frac{\sum(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum(X_i - \bar{X})^2 \sum(Y_i - \bar{Y})^2}}$$

$$r = \frac{5,204}{\sqrt{(0,423)(66,613)}} = 0,9844$$

Se observa que el grado de ajuste $r = 0,9844$ del modelo es alto, indicando alta confiabilidad para obtener el valor, que será la tolerancia de desalineación paralela para esta velocidad.

5.4.1.5 Tolerancia de desalineación

$$0,71 = 12,387(x) + 0x = 0,057$$

El valor de x es nuestro estándar de tolerancia, significa que en desalineación paralela a una velocidad de 1800 rpm, es admisible hasta 0,057 mm de desalineación.

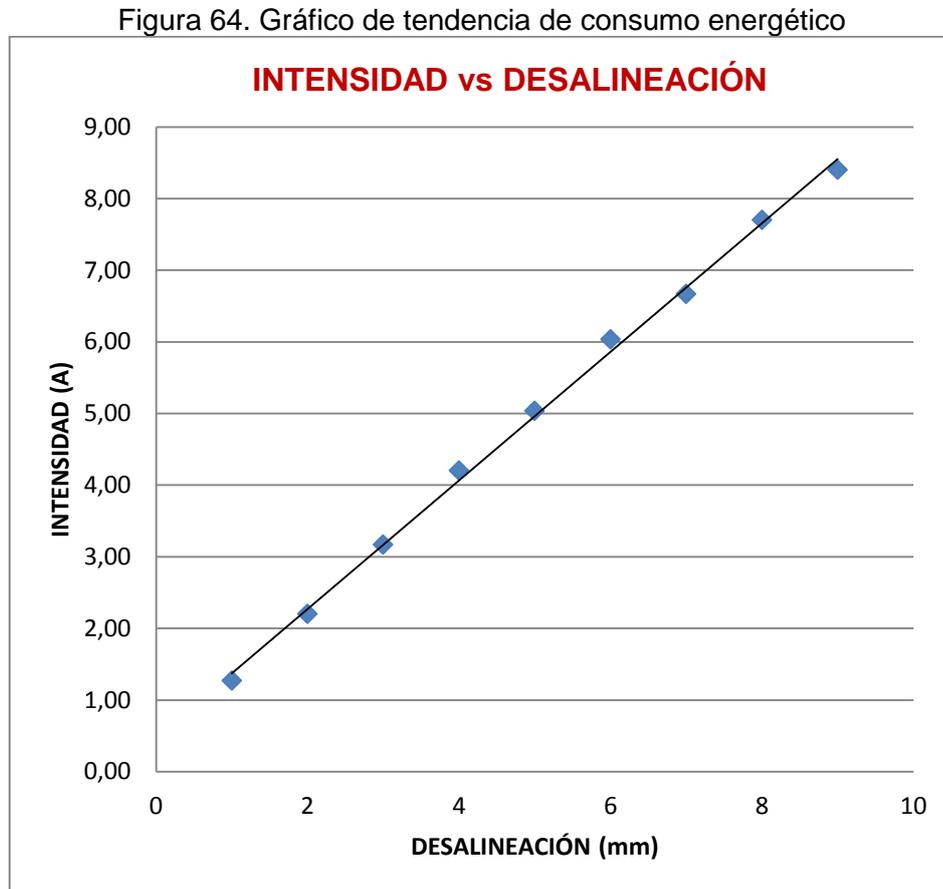
5.4.1.6 Consumo energético

Tabla 33. Desalineación vs Corriente

| Desalineación paralela [mm] | Intensidad I [A] | Intensidad II [A] | Intensidad III [A] | Intensidad Equivalente [A] | Voltaje [V] |
|-----------------------------|------------------|-------------------|--------------------|----------------------------|-------------|
| 0.0 | 1,5 | 1,5 | 0,8 | 1,27 | 210 |
| 0.1 | 2,3 | 2,5 | 1,8 | 2,20 | 210 |
| 0.2 | 3,5 | 3,3 | 2,7 | 3,17 | 210 |
| 0.3 | 4,8 | 4,3 | 3,5 | 4,20 | 210 |
| 0.4 | 5,1 | 5,2 | 4,8 | 5,03 | 210 |
| 0.5 | 5,9 | 6,3 | 5,9 | 6,03 | 210 |
| 0.6 | 6,3 | 7,1 | 6,6 | 6,67 | 210 |
| 0.7 | 7,1 | 8,1 | 7,9 | 7,70 | 210 |
| 0.8 | 7,7 | 9,0 | 8,5 | 8,40 | 210 |

Fuente: Autores

Con los datos obtenidos en la Tabla 33 se construye una gráfica (ver Figura 64), donde se determina que el amperaje es directamente proporcional a la desalineación, afirmando que la desalineación está asociada a un incremento del consumo eléctrico.



Fuente: Autores

Tabla 34. Trabajo de motor

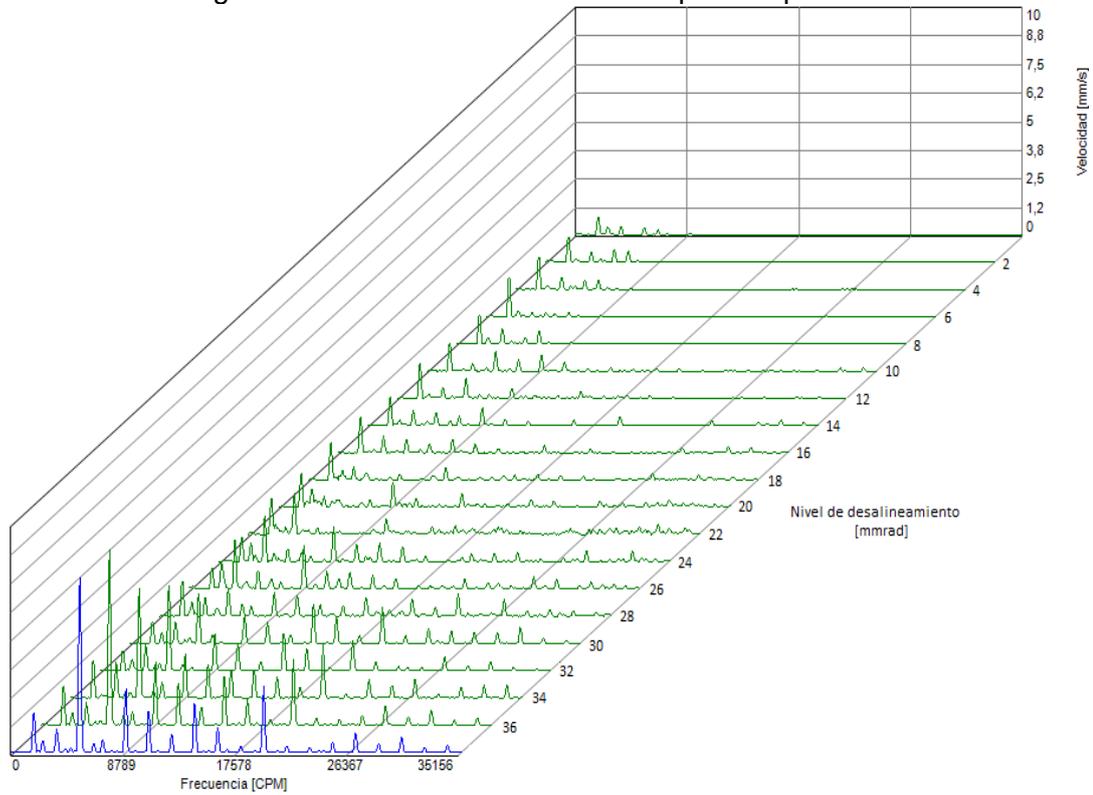
| Trabajo [%] | Potencia [kW] | Consumo anual[kW] | Costo [USD] |
|-------------|---------------|-------------------|-------------|
| 9 | 0,39 | 3378 | 338 |
| 16 | 0,68 | 5867 | 587 |
| 23 | 0,98 | 8445 | 844 |
| 30 | 1,30 | 11200 | 1120 |
| 36 | 1,55 | 13423 | 1342 |
| 43 | 1,86 | 16089 | 1609 |
| 48 | 2,06 | 17778 | 1778 |
| 55 | 2,38 | 20534 | 2053 |
| 60 | 2,59 | 22401 | 2240 |

Fuente: Autores

5.4.2 Desalineación angular

5.4.2.1 *Gráfica de evolución de espectros.* Se muestra la gráfica de espectros de vibración en la figura número 65.

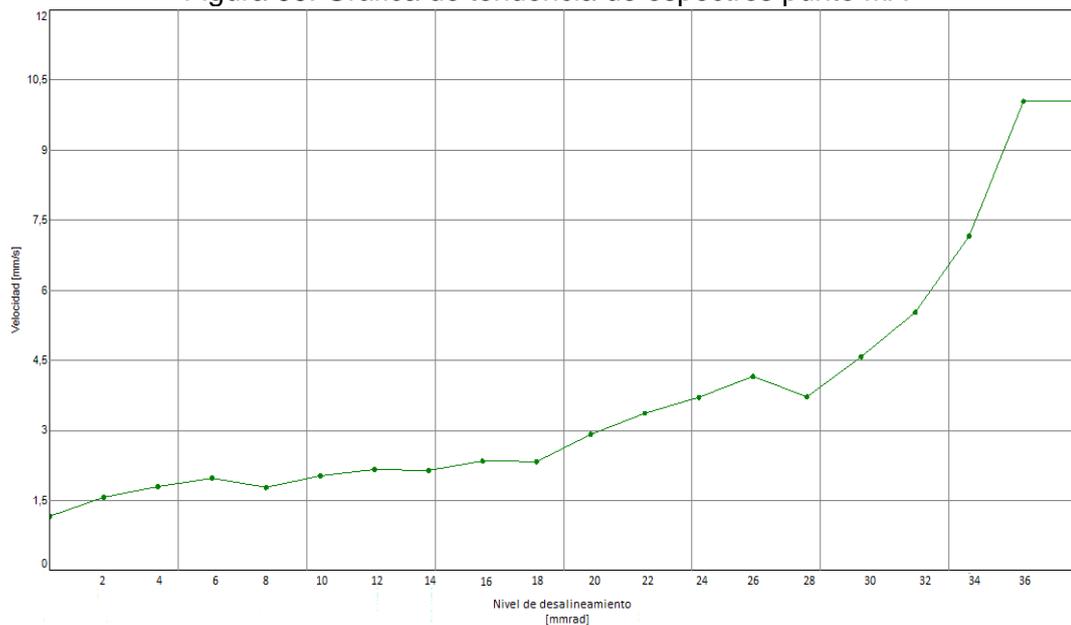
Figura 65. Gráfica de evolución de espectros punto MA



Fuente: Autores

5.4.2.2 *Gráfica de tendencia de espectros*

Figura 66. Gráfica de tendencia de espectros punto MA



Fuente: Autores

5.4.2.3 *Tabla de desalineación vs vibración.* En la Tabla 35 se muestra una porción de los datos medidos los cuales son usados para la construcción de la Figura 67, el resto de los datos se pueden ver en el Anexo I. Se empleó este conjunto de datos porque simula el comportamiento del incremento de la desalineación angular, resaltando el resto de los datos se fueron influenciados en mayor medida por factores no controlados como la frecuencia natural de la estructura.

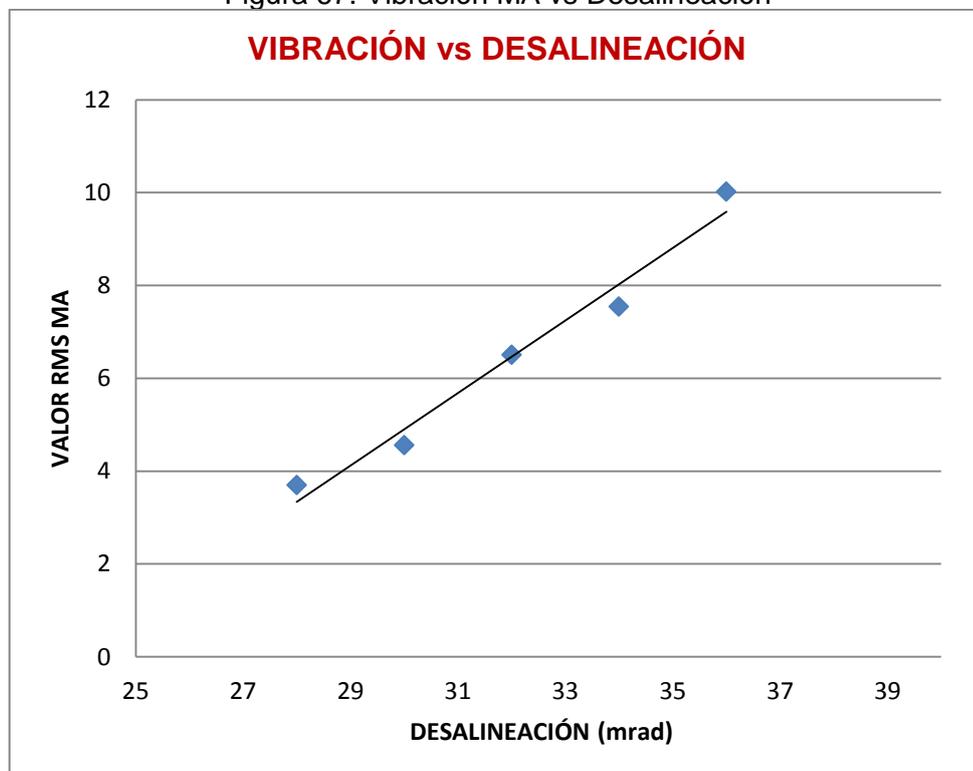
Tabla 35. Datos de desalineación angular a 1800 rpm

| N° Medidas | Desalineación [mrad] | Valores RMS | |
|---------------|-------------------------|-------------|--------|
| | | MV | MA |
| 1 | 28 | 4,297 | 3,699 |
| 2 | 30 | 5,457 | 4,555 |
| 3 | 32 | 6,828 | 6,506 |
| 4 | 34 | 6,315 | 7,542 |
| 5 | 36 | 8,848 | 10,021 |

Fuente: Autores

Con los valores obtenidos se realiza un gráfico: vibración MA vs desalineación; con el fin de observar los efectos de la desalineación angular, ver Figura 67.

Figura 67. Vibración MA vs Desalineación



Fuente: Autores

5.4.2.4 Regresión lineal. Se puede ver la regresión lineal en la tabla número 36 que se presenta a continuación.

Tabla 36. Datos de regresión

| X_i | Y_i | $(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})$ | $(X_i - \bar{X})^2$ | $(Y_i - \bar{Y})^2$ |
|-----------------------|--------------------------|----------------------------------|---------------------|---------------------|
| 28 | 3,699 | 11,062 | 16 | 7,648 |
| 30 | 4,555 | 3,819 | 4 | 3,646 |
| 32 | 6,506 | 0 | 0 | 0,002 |
| 34 | 7,542 | 2,154 | 4 | 1,161 |
| 36 | 10,021 | 14,225 | 16 | 12,648 |
| $\Sigma \bar{X} = 32$ | $\Sigma \bar{Y} = 6,465$ | $\Sigma = 31,262$ | $\Sigma = 40$ | $\Sigma = 25,106$ |

Fuente: Autores

Los estimadores para el ajuste del modelo se calculan de la siguiente manera:

$$a = \frac{\sum(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sum(X_i - \bar{X})^2} = \frac{31,262}{40} = 0,782$$

$$b = \bar{Y} - (a)(\bar{X})$$

$$b = 6,465 - (0,782)(32) = 18,545$$

Sustituyendo los valores calculados en la ecuación característica se tiene:

$$y = 0,7815x + 18,45$$

Para determinar el grado de ajuste del modelo, se calcula el coeficiente de determinación, de la siguiente manera:

$$r = \frac{\sum(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum(X_i - \bar{X})^2 \sum(Y_i - \bar{Y})^2}}$$

$$r = \frac{31,262}{\sqrt{(40)(25,106)}} = 0,9732$$

Se observa que el grado de ajuste $r = 0,9732$ del modelo es alto, indicando alta confiabilidad para obtener el valor, que será la tolerancia de desalineación angular para esta velocidad.

5.4.2.5 Tolerancia de desalineación. Se calcula como se muestra a continuación.

$$0,71 = 0,7815(x) + 0x = 0,91$$

El valor de x es nuestro estándar de tolerancia, significa que en desalineación angular a una velocidad de 1800 rpm, es admisible hasta 0,91 mrad de desalineación.

5.4.2.6 Consumo energético. El consumo energético se muestra en la tabla número 37, presentada a continuación.

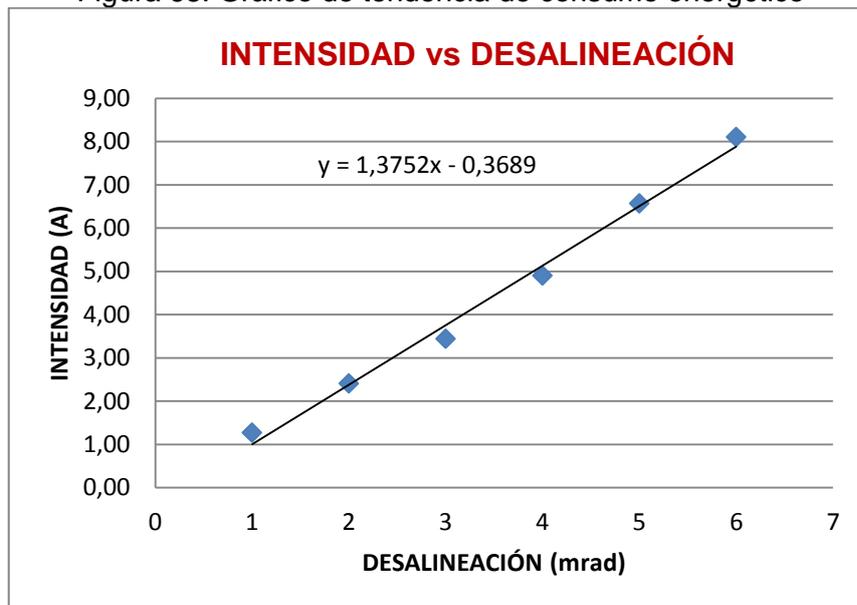
Tabla 37. Desalineación vs Corriente

| Desalineación Angular [mrad] | Intensidad I [A] | Intensidad II [A] | Intensidad III [A] | Intensidad Equivalente [A] | Voltaje [V] |
|------------------------------|------------------|-------------------|--------------------|----------------------------|-------------|
| 0.0 | 1,5 | 1,5 | 0,8 | 1,27 | 210 |
| 6 | 2,8 | 2,5 | 1,9 | 2,40 | 210 |
| 12 | 3,4 | 3,8 | 3,1 | 3,43 | 210 |
| 18 | 4,9 | 5 | 4,8 | 4,90 | 210 |
| 24 | 6,1 | 6,7 | 6,9 | 6,57 | 210 |
| 38 | 7,8 | 8,4 | 8,1 | 8,10 | 210 |

Fuente: Autores

Con los datos obtenidos en la Tabla 40 se construye una gráfica ver figura 68, donde se determina que el amperaje es directamente proporcional a la desalineación, afirmando que la desalineación está asociada a un incremento del consumo eléctrico.

Figura 68. Gráfico de tendencia de consumo energético



Fuente: Autores

Tabla 38. Trabajo de motor

| Trabajo [%] | Potencia [kW] | Consumo anual[kW] | Costo [USD] |
|-------------|---------------|-------------------|----------------|
| 9 | 0,37 | 3224 | 322,43 |
| 17 | 0,71 | 6109 | 610,93 |
| 25 | 1,01 | 8740 | 873,97 |
| 35 | 1,44 | 12473 | 1247,31 |
| 47 | 1,93 | 16716 | 1671,57 |
| 58 | 2,39 | 20619 | 2061,88 |

Fuente: Autores

5.5 Estándares de desalineación

En la Tabla 39 se muestran las tolerancias de desalineación paralela y angular obtenidas para un motor de 5 Hp marca WEG acoplado a un eje mediante un acople flexible tipo araña. Se evidencia que con el incremento de la velocidad del motor la desalineación paralela y angular admisible disminuye. Se determina que para este tipo de acople la desalineación angular es más admisible que la desalineación paralela y del mismo modo su consumo energético en progresión con la desalineación paralela será mayor que con la desalineación angular.

Tabla 39. Estándares de desalineación

| Velocidad [rpm] | Desalineación paralela [mm] | Desalineación angular [mrad] |
|-----------------|-----------------------------|------------------------------|
| 600 | 0,100 | 4,41 |
| 1000 | 0,075 | 2,13 |
| 1400 | 0,044 | 1,46 |
| 1800 | 0,057 | 0,91 |

Fuente: Autores

5.6 Comparación de resultados

Esta tabla de resultados obtenidos, se realiza una comparación con los estándares de PRUFTECHNIK (**ANEXO J**), donde los valores de desalineación paralela encontrados se aproxima con sus valores excelentes de tolerancia, mientras que nuestros valores de desalineación angular se aproximan a sus valores aceptables de tolerancia, a acepción de 600 RPM debido al tipo de acople que contamos.

CAPITULO VI

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

El evaluar el estado inicial de un equipo; inspeccionando su estructura, anclajes, sistema vibratorio y realizar las debidas correcciones, disminuyen los niveles de vibración ayudando a que los datos recolectados por el equipo de análisis vibracional sean los correctos.

La planificación e implementación de una metodología organizada y secuencial ayuda al cumplimiento ordenado del proceso de toma de datos de vibraciones de desalineación y el consumo energético; determinando que la metodología propuesta en esta tesis fue la adecuada. Estableciendo los instrumentos para la medición de las variables como Optalign Plus para la desalineación, Vibracheck 200 para la vibración, un foto tacómetro para la medición de la velocidad y una pinza amperimétrica para la medición de la corriente consumida.

Con los datos obtenidos de las mediciones se creó una tabla de tolerancias de desalineación donde a 600 rpm se admite 0,1 mm de desalineación paralela y 4,41 mrad de desalineación angular, a 1000 rpm 0,075 mm de desalineación paralela y 2,13 mrad de desalineación angular, a 1400 rpm 0,044 mm de desalineación paralela y 1,46 mrad de desalineación angular, y a 1800 rpm 0,057 mm de desalineación paralela y 0,91 mrad de desalineación angular. Estos valores se obtuvieron mediante ecuaciones resultantes del proceso de regresión lineal de los datos obtenidos.

El consumo energético resultante de la desalineación angular es menor que el consumo energético de la desalineación paralela, ya que en esta última se incrementa el nivel vibratorio más que en la desalineación angular, generando mayor fricción y trabajo por ende un mayor consumo de energía en eldesalineación.

Se concluye también que ningún nivel de desalineación es admisible por más bajo que este sea porque no existe la alineación perfecta ya sea por la dilatación de los acoples y siempre va a mostrar desalineaciones.

Mediante el trabajo realizado se concluye que no existe alineación perfecta, es decir valores 0,0 iniciales, ya que siempre va a existir un pequeño porcentaje de consumo energético a causa de la desalineación.

6.2 Recomendaciones

Colocar los acelerómetros sobre superficies planas en los puntos del apoyo para asegurar la veracidad de los datos medidos.

Construir una estructura robusta desde el comienzo, en vez de reforzar una estructura existente de baja robustez por cuestiones de frecuencias naturales.

Cada tipo de acople tienen diferentes niveles admisibles de desalineación, por lo que se recomienda realizar estudios de desalineación enfocados a cada tipo de acople y la eficiencia energética que cada uno de estos.

Implementar en el plan de mantenimiento la alineación de los motores eléctricos en la industria para mejorar la eficiencia energética ya que en la mayoría de industrias no es considerado la desalineación.

BIBLIOGRAFÍA

ARIAS, P. *Métodos Numéricos*. 2005.

DAZA , G. 2007. *Apuntes del Curso de Vibraciones Mecánicas*. Chile : s.n., 2007.

DIRECT INDUSTRY. 2014. Direct INDUSTRY. [En línea] Direct INDUSTRY, 5 de 11 de 2014. [Citado el: 22 de 8 de 2015.] <http://www.directindustry.es/prod/testing-machines-inc/product-55801-413147.html>.

DOMINGUEZ, Alirio. 2013. *Vibraciones Mecánicas - Analisis Espectral*. [En línea] 2013. <http://mantenancela.blogspot.com/2013/10/vibraciones-mecanicas-analisis-espectral.html>.

FACOMET. 2012. *Facomet.com* . [En línea] 15 de enero de 2012. [Citado el: 14 de Agosto de 2015.] <http://www.facomet.cl/fijaciones-pernos-expansion.php>.

GARCIA, L. 2014. *Técnicas de Diagnóstico*. España : s.n., 2014.

IDEAR. 2011. *MAINTraq Analyzer Guía De Mediciones*. *MAINTraq Analyzer Guía De Mediciones*. [En línea] 2011. <http://www.idearnet.com.ar/manuales/MAINTraqAnalyzer-GuiaDeOperacion.pdf>.

INEN. 2014. *Norma Técnica Ecuatoriana. NTE INEN-ISO 2307*. Quito : Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2014.

—. 2011. *Reglamento general a la ley del sistema ecuatoriano de la calidad*. Quito : INEN, 2011.

ISASTUR. 2012. *Manual de seguridad e instrucciones de trabajo*. Mexico : Prentice, 2012.

ISO 10816-1. 1995. "Vibración mecánica - Evaluación de la vibración en una máquina mediante medidas en partes no rotativas". [En línea] 1995. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:10816:-1:ed-1:v1:en>.

ISO 2041. 2009. *ISO 2041, Mechanical vibration, shock and condition monitoring -- Vocabulary*. [En línea] 2009. http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=35848.

MEJIA , Diego. 2014. *Diseño e implementación de un manual de operación y mantenimiento para los laboratorios de electrotecnia, electrónica, maquinas eléctricas y vibraciones, de la Facultad de mecánica*. Riobamba : s.n., 2014.

MURRAY & LARRY. 2009. *ESTADÍSTICA*. México : MC GRAW HILL 4° Edición, 2009.

.OPPENHEIM, Alan. 2011. *Tratamiento de Señales en Tiempo Discreto*. s.l. : Pearson Educación, 2011.

OPTALIGN PLUS. ALIGNMENT SYSTEMS. 2002. 2002.

PRINCE . 2014. *The majestic line, cilindrs*. North sioux city : Prince, 2014.

SALGADO, LEON EDWIN. 2005. *www.ecured.cu. www.ecured.cu.* [En línea] 15 de enero de 2005. [Citado el: 27 de mayo de 2015.]
[http://www.ecured.cu/index.php/EcuRed:Enciclopedia_cubana.](http://www.ecured.cu/index.php/EcuRed:Enciclopedia_cubana)

SÁNCHEZ, Marin. 2007. *Mantenimiento de Mecánico de Máquinas.* s.l. : Publicaciones de la Univesitat Jaume I, 2007.

SINAIS. 2013. Sinais, Ingeniería de Mantenimiento. *Sinais, Ingeniería de Mantenimiento.* [En línea] 2013. [http://www.sinais.es/curso-vibraciones.html.](http://www.sinais.es/curso-vibraciones.html)

SINGIRESU, Rao. 2012. *Vibraciones Mecánicas.* México : Pearson Educación, 2012.

WHITE, Glen. 2010. *Introducción al Análisis de Vibraciones.* Woburn, USA : Azima DLI, 2010.

WOLFSON , RICHARD . 2011. *Fundamentos de Física.* s.l. : ADDISON-WESLEY, 2011.

