



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE MECÁNICA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO**

**“CONSTRUCCIÓN DE UN MÓDULO DE PRUEBAS PARA
SIMULAR MODOS DE FALLA EN SISTEMAS DE
TRANSMISIÓN DE POTENCIA CON POLEA PARA EL
LABORATORIO DE DIAGNÓSTICO TÉCNICO”**

**JAYA VACACELA MILTON DAVID
PAGUAY CALI DIEGO SANTIAGO**

**TRABAJO DE TITULACIÓN
TIPO: PROPUESTAS TÉCNICAS**

Previa a la obtención del Título de:

INGENIERO DE MANTENIMIENTO

**RIOBAMBA - ECUADOR
2017**

ESPOCH

Facultad de Mecánica

**CERTIFICADO DE APROBACIÓN
DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

2017-01-25

Yo recomiendo que el Trabajo de Titulación preparado por:

JAYA VACACELA MILTON DAVID

Titulado:

“CONSTRUCCIÓN DE UN MÓDULO DE PRUEBAS PARA SIMULAR MODOS DE FALLA EN SISTEMAS DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA CON POLEA PARA EL LABORATORIO DE DIAGNÓSTICO TÉCNICO”

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

INGENIERO DE MANTENIMIENTO

Ing. Carlos José Santillán Mariño
DECANO DE LA FAC. DE MECÁNICA

Nosotros coincidimos con esta recomendación:

Ing. Eduardo Segundo Hernández Dávila
DIRECTOR DE TESIS

Ing. Edisson Fernando Calderón Freire
MIEMBRO

ESPOCH

Facultad de Mecánica

**CERTIFICADO DE APROBACIÓN
DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

2017-01-25

Yo recomiendo que el Trabajo de Titulación preparado por:

PAGUAY CALI DIEGO SANTIAGO

Titulado:

“CONSTRUCCIÓN DE UN MÓDULO DE PRUEBAS PARA SIMULAR MODOS DE FALLA EN SISTEMAS DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA CON POLEA PARA EL LABORATORIO DE DIAGNÓSTICO TÉCNICO”

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

INGENIERO DE MANTENIMIENTO

Ing. Carlos José Santillán Mariño
DECANO DE LA FAC. DE MECÁNICA

Nosotros coincidimos con esta recomendación:

Ing. Eduardo Segundo Hernández Dávila
DIRECTOR DE TESIS

Ing. Edisson Fernando Calderón Freire
MIEMBRO

ESPOCH

Facultad de Mecánica

EXAMINACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

NOMBRE DEL ESTUDIANTE: JAYA VACACELA MILTON DAVID

TRABAJO DE TITULACIÓN: “CONSTRUCCIÓN DE UN MÓDULO DE PRUEBAS PARA SIMULAR MODOS DE FALLA EN SISTEMAS DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA CON POLEA PARA EL LABORATORIO DE DIAGNÓSTICO TÉCNICO”

Fecha de Examinación: 2017-11-21

RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:

COMITÉ DE EXAMINACIÓN	APRUEBA	NO PRUEBA	FIRMA
Ing. Ángel Guamán Mendoza PRESIDENTE TRIB.DEFENSA			
Ing. Eduardo S. Hernández Dávila DIRECTOR			
Ing. Edison F. Calderón Freire MIEMBRO			

* 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. Ángel Guamán Mendoza
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

ESPOCH

Facultad de Mecánica

EXAMINACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

NOMBRE DEL ESTUDIANTE: PAGUAY CALI DIEGO SANTIAGO

TRABAJO DE TITULACIÓN: “CONSTRUCCIÓN DE UN MÓDULO DE PRUEBAS PARA SIMULAR MODOS DE FALLA EN SISTEMAS DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA CON POLEA PARA EL LABORATORIO DE DIAGNÓSTICO TÉCNICO”

Fecha de Examinación: 2017-11-21

RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:

COMITÉ DE EXAMINACIÓN	APRUEBA	NO PRUEBA	FIRMA
Ing. Ángel Guamán Mendoza PRESIDENTE TRIB.DEFENSA			
Ing. Eduardo S. Hernández Dávila DIRECTOR			
Ing. Edisson F. Calderón Freire MIEMBRO			

* 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. Ángel Guamán Mendoza
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

DERECHOS DE AUTORIA

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

JAYA VACACELA MILTON DAVID

PAGUAY CALI DIEGO SANTIAGO

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD

Nosotros, Jaya Vacacela Milton David y Paguay Cali Diego Santiago, declaramos que el presente trabajo de titulación es de nuestra autoría y que los resultados del mismo son auténticos y originales. El texto constante en el documento que proviene de otra fuente está debidamente citadas y referenciados.

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

JAYA VACACELA MILTON DAVID

C.I: 060473934-2

PAGUAY CALI DIEGO SANTIAGO

C.I: 060425795-6

DEDICATORIA

El presente trabajo de titulación lo dedico primeramente a Dios por darme la oportunidad de vivir, así como también bendecirme cada día.

A mis padres Raúl Paguay y Consuelo Cali quienes con sus esfuerzos y trabajo de día a día pudieron darme la oportunidad de prepararme. Mi hermano Kevin quien con sus palabras de aliento me animaba a seguir luchando para alcanzar este sueño, porque sé que el sigue mis pasos y era prohibido rendirse.

A mi tío Marcelo Paguay quien me impulso e inculco en mí, ese espíritu de lucha y perseverancia para alcanzar esta meta, a mi Abuelita Luz María quien es un segunda madre, la que me con su cariño y bendiciones me llenaba de esperanza para seguir luchando por mis sueños. Mis Abuelitos Santiago Paguay (+), José Cali (+), Carmen Llamuca (+), que en paz descansen, que me bendicen desde los cielos.

Finalmente dedico este triunfo a Mayrita el amor de mi vida, quien estaba a mi lado en el transcurso de este logro, pues ella me enseñó a ver la vida de diferente manera.

Diego Santiago Paguay Cali

Este trabajo lo dedico con mucho amor a mis familiares, que a través del tiempo me han apoyado con en el afán de verme crecer como ser humano y como profesional, por sus palabras de ánimo en cada acierto y error que he vivido, dándome la fortaleza para seguir adelante y alcanzar mis objetivos y metas en la vida.

A mi madrecita Miriam Vacacela quien siempre se ha preocupado y entregado en el afán de darme lo mejor, aunque ha renunciado a muchas cosas, cosas que merecía y merece mucho más que yo, Dios te bendiga mamita por cada sacrificio y lágrima derramada por mí.

Segundo Jaya, padre querido a ti que me has apoyado a lo largo de mí caminar, con tu vivo ejemplo de que nada es imposible en la vida y que aunque tropecemos nunca es tarde para levantarse y luchar por nuestros sueños, mil gracias.

A mis hermanos, que me han apoyado incondicionalmente y han sido un motivo y sustento para el logro alcanzado, mil gracias hermanos míos, que Dios los bendiga grandemente

Milton David Jaya Vacacela

AGRADECIMIENTO

Agradezco infinitamente a Dios porque me bendice todos los días, porque me dio la oportunidad para alcanzar este sueño, ya que sin su bendición no se hubiera hecho realidad.

A mis padres Raúl y Consuelo, así también a mi hermano Kevin quienes son el motor de mi vida para seguir luchando a pesar de las caídas, ya que ellos estaban en los momentos más difíciles de mi vida, pero ellos con sus palabras de aliento me motivaban para seguir en la lucha.

A mi tía Sandra Paguay quien fue una de las personas quien me apoyo en el transcurso de este tiempo.

Un agradecimiento eterno a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo en especial a la Carrera de Ingeniería de Mantenimiento, a mis tutores de trabajo de titulación por brindarme los conocimientos para la realización del mismo.

Diego Santiago Paguay Cali

Principalmente agradezco a mi Dios, por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud y vida para alcanzar este logro, además de su infinita bondad y misericordia.

Un especial agradecimiento a mis padres, hermanos, familiares y amigos que creyeron en mí, aquellos que siempre estuvieron detrás de mí proceso académico. Al Sr. Vicente Guevara y familia quienes con sus consejos y apoyo, inculcaron en mí un anhelo ferviente de superación.

Finalmente expreso gratitud a mi querida escuela de Ingeniería de Mantenimiento, a mis docentes a lo largo de mi formación y en especial al Ing. Eduardo Hernández e Ing., Edison Calderón, quienes impartieron sus conocimientos técnicos y personales, permitiéndome formar parte de esta notoria profesión.

Milton David Jaya Vacacela

CONTENIDO

	Pág.
1. GENERALIDADES	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Justificación	2
1.3 Objetivos.....	2
1.3.1 <i>Objetivo general</i>	2
1.3.2 Objetivos específicos	3
2. MARCO TEÓRICO.....	4
2.1 Sistema de transmisión con polea-correa	4
2.1.1 <i>Descripción de los elementos del sistema.</i>	4
2.1.2 <i>Relación de velocidades.</i>	5
2.1.2.1 <i>Aumento de velocidad de giro.</i>	5
2.1.2.2 <i>Disminución de velocidad de giro.</i>	5
2.1.2.3 <i>Mantenimiento de velocidad de giro</i>	5
2.2 Poleas y sus características	6
2.2.1 <i>Partes de una polea.</i>	6
2.2.2 <i>Selección de los diámetros de las poleas.</i>	6
2.3 Tipos de Bandas o Correas.	7
2.3.1 <i>Correas en V.</i>	7
2.3.2 <i>Clase de correas en V.</i>	8
2.3.2.1 <i>Correa sin fin de lados planos.</i>	9
2.3.3 <i>Geometría de la transmisión de correa.</i>	9
2.3.3.1 <i>Distancia entre centros.</i>	10
2.3.3.2 <i>Longitud de la correa.</i>	10
2.3.3.3 <i>El ángulo de contacto.</i>	6
2.3.3.4 <i>Potencia nominal real que se puede transmitir por una correa.</i>	6
2.3.3.5 <i>Potencia corregida.</i>	7
2.3.3.6 <i>Selección del factor de servicio.</i>	7
2.3.3.7 <i>Tamaño del perfil en correas normales.</i>	8
2.3.3.8 <i>Determinación de la potencia nominal transmisible por correa</i>	8
2.3.3.9 <i>Determinación de la cantidad total de correas necesarias.</i>	9
2.4 Análisis Vibracional	10
2.4.1 <i>Vibración simple</i>	10
2.4.2 <i>Vibración compuesta.</i>	11
2.4.3 <i>Transformada de Fourier</i>	11
2.4.5 <i>Resonancia.</i>	13
2.5 Modos de falla	14
2.5.1 <i>Modos de falla en sistemas de transmisión mediante Banda-Polea.</i>	14
2.5.1.1 <i>Desalineación de poleas.</i>	14
2.5.1.2 <i>Resonancia de banda o golpe de banda</i>	15
2.5.1.3 <i>Espectro de desalineación en poleas</i>	15
2.5.1.4 <i>Espectro de resonancia en correas.</i>	16
2.5.2 <i>Puntos de Medición.</i>	16
2.6 Carga en motores eléctricos Trifásicos.....	17

2.6.1	<i>Potencia de entrada nominal</i>	17
2.6.2	<i>Potencia mecánica</i>	17
2.6.3	<i>Par de torsión del sistema de transmisión</i>	18
3.	SELECCIÓN Y MONTAJE DE ELEMENTOS DEL MÓDULO	24
3.1	Módulo con sus elementos principales	24
3.2	Selección de elementos del módulo de prueba	25
3.2.1	<i>Selección del motor eléctrico</i>	25
3.2.1.1	<i>Características del motor eléctrico</i>	25
3.2.2	<i>Selección del alternador</i>	26
3.2.2.1	<i>Características del alternador</i>	26
3.2.3	<i>Selección de poleas</i>	26
3.2.3.1	<i>Diámetro de la polea conducida y conductora</i>	26
3.2.3.2	<i>Características de la polea</i>	27
3.2.3.3	<i>Relación de transmisión del eje motriz y eje conducido</i>	27
3.2.4	<i>Selección de la correa</i>	27
3.2.4.1	<i>Potencia corregida</i>	27
3.2.4.2	<i>Selección del perfil de correa</i>	28
3.2.4.3	<i>Límite de distancia entre centros</i>	28
3.2.4.4	<i>Longitud primitiva de la correa</i>	28
3.2.4.5	<i>Ángulo de contacto de la correa</i>	29
3.2.4.6	<i>Determinación de la potencia nominal transmisible por correa</i>	29
3.2.4.7	<i>Determinación de la cantidad total necesaria de correas</i>	30
3.2.4.8	<i>Calculo de la frecuencia fundamental de la banda</i>	30
3.3	Cálculo de la tensión ejercida por la correa.....	31
3.3.1	<i>Cálculo de la fuerza ejercida por el alternador</i>	32
3.3.2	<i>Diagrama de cuerpo libre del tensor</i>	33
3.3.3	<i>Sumatoria de fuerzas en el eje de las abscisas</i>	34
3.3.4	<i>Sumatoria de fuerzas en el eje ordenadas</i>	34
3.3.5	<i>Sumatoria de momentos en el punto "R"</i>	34
3.4	Factor de Seguridad	36
3.5	Montaje del módulo de pruebas.....	38
3.5.1	<i>Montaje de la base del módulo de pruebas</i>	39
3.5.1.1	<i>Características de los elementos principales de la base del módulo</i>	39
3.5.2.1	<i>Montaje del motor eléctrico</i>	40
3.5.2.2	<i>Montaje del alternador</i>	40
3.5.2.3	<i>Montaje de la Correa trapezoidal</i>	41
3.5.2.4	<i>Tensado de la correa trapezoidal</i>	41
4.	MATERIALES Y MÉTODOS	43
4.1	Modos de falla a diagnosticar	43
4.2	Método para inducir desalineación paralela	43
4.3	Método para inducir desalineamiento Angular Horizontal	44
4.4	Método para inducir el fallo de desalineación Angular Vertical.....	47
4.5	Equipos por utilizar para la toma de datos	50
4.5.1	<i>Equipo para Alineación laser de poleas</i>	50
4.5.2	<i>Equipo para el diagnóstico de vibraciones</i>	50
4.5.3	<i>Equipo digital foto tacómetro</i>	51
4.5.4	<i>Equipo Analizador de energía</i>	51
4.5.5	<i>Pinzas amperimétricas</i>	51

4.5.6	<i>Equipo para análisis de termografía.....</i>	52
4.5.7	<i>Relojes Comparadores.</i>	52
4.5.8	<i>Puntos de medición para la adquisición de datos.....</i>	53
4.6	<i>Cálculos de potencia del motor eléctrico trifásico.....</i>	54
4.6.1	<i>Cálculo de la potencia del motor eléctrico.</i>	54
4.6.1.1	<i>Potencia mecánica a frecuencia de 48 Hz.....</i>	55
4.6.1.2	<i>Cálculo de la potencia eléctrica al 80 % de su carga a 48 Hz.</i>	55
4.7	<i>Procedimiento para simular la desalineación de poleas.</i>	56
4.7.1	<i>Procedimiento para simular la desalineación paralela.....</i>	56
4.7.2	<i>Procedimiento para simular la desalineación angular horizontal.....</i>	61
4.7.3	<i>Procedimiento para simular la desalineación angular vertical.....</i>	66
5.	MEDICIÓN, ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS....	72
5.1	<i>Pruebas iniciales de funcionamiento.....</i>	72
5.1.1	<i>Mediciones iniciales de Vibraciones.....</i>	73
5.1.1.1	<i>Medición y análisis de Frecuencia Natural de la Banda.</i>	73
5.1.1.2	<i>Medición y análisis de Frecuencias Naturales del módulo.....</i>	73
5.1.2	<i>Pruebas de Alineación correcta de las poleas.....</i>	74
5.1.3	<i>Mediciones iniciales de la calidad de la energía.</i>	75
5.1.3.1	<i>Medición inicial de la calidad de energía.</i>	75
5.1.4	<i>Medición y análisis de Frecuencias en condiciones ideales.</i>	75
5.2	<i>Medición de los distintos modos de falla concernientes a las desalineaciones.....</i>	76
5.2.1.1	<i>Tabulación de resultados de la desalineación paralela.....</i>	77
5.2.1.2	<i>Regresión lineal de desalineación paralela.</i>	78
5.2.1.3	<i>Gráfica de tendencia de la desalineación paralela vs rms total.....</i>	82
5.2.1.4	<i>Tabulación del consumo energético vs la desalineación paralela.....</i>	82
5.2.1.5	<i>Grafica de tendencia de la desalineación paralela vs Potencia.....</i>	82
5.2.2	<i>Mediciones concernientes a la desalineación angular horizontal.....</i>	83
5.2.2.1	<i>Tabulación de resultados de la desalineación angular Horizontal.....</i>	84
5.2.2.2	<i>Regresión lineal de la desalineación angular horizontal.....</i>	84
5.2.2.3	<i>Gráfica de tendencia de la desalineación angular horizontal vs rms total.....</i>	87
5.2.2.4	<i>Tabulación del consumo energético vs la desalineación.....</i>	88
5.2.2.5	<i>Grafica de tendencia de la DAH vs Potencia.....</i>	88
5.2.3	<i>Mediciones concernientes a la desalineación angular vertical.....</i>	89
5.2.3.1	<i>Tabulación de resultados de la desalineación angular vertical.....</i>	89
5.2.3.2	<i>Regresión lineal de la desalineación angular vertical.....</i>	90
5.2.3.3	<i>Gráfica de tendencia de la desalineación angular vertical vs rms total.....</i>	93
5.2.3.4	<i>Tabulación del consumo energético vs la desalineación angular vertical.....</i>	93
5.2.3.5	<i>Grafica de tendencia de la desalineación angular vertical vs Potencia.....</i>	94
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	96
6.1	<i>Conclusiones.....</i>	96
6.2	<i>Recomendaciones.....</i>	97

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2-1. Diámetros primitivos mínimos para poleas.....	7
Tabla 2-2. Reducción de la capacidad de potencia por el ángulo de contacto.....	6
Tabla 2-3. Factor De Servicio.....	7
Tabla 2-4. Factor empírico según el factor de correas.....	9
Tabla 2-5. Valores de C3.....	10
Tabla 3-1. Cantidad necesaria de cada elemento.....	25
Tabla 3-2. Características del motor eléctrico.....	25
Tabla 3-3. Características del Alternador.....	26
Tabla 3-4. Características de la polea conducida y conductora.....	27
Tabla 3-5. Elementos que conforman la base del módulo.....	39
Tabla 4-1. Dimensiones de desalineamiento Angular.....	46
Tabla 4-2. Medias para desalienación angular vertical.....	49
Tabla 4-3. Procedimiento para simular la desalineación paralela.....	56
Tabla 4-5. Procedimiento para simular la desalineación angular vertical.....	67
Tabla 5-1. Medidas iniciales de la calidad de la energía.....	75
Tabla 5-2. Frecuencias del espectro característicos.....	76
Tabla 5-3. Datos de vibración obtenidos.....	77
Tabla 5-4. Regresión lineal de la desalineación paralela.....	78
Tabla 5-5. Tabulación del consumo energético vs la desalineación paralela.....	82
Tabla 5-6. Datos de vibración obtenidos.....	84
Tabla 5-7. Regresión lineal de la desalineación angular horizontal.....	85
Tabla 5-8. Datos de potencia en relación con la desalineación.....	88
Tabla 5-9. Datos de vibración de la desalineación Angular vertical obtenidos.....	90
Tabla 5-10. Regresión lineal de la desalineación angular vertical.....	90
Tabla 5-11. Tabulación del consumo energético vs la desalineación angular vertical..	94

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2-1. Elementos de sistema de trasmisión	4
Figura 2-2. Partes de una polea.....	6
Figura 2-3. Tipos de correas	7
Figura 2-4. Zonas de correas en "V"	8
Figura 2-5. Correa sin fin de lados planos	9
Figura 2-6. Geometría de la trasmisión de correas	9
Figura 2-7. Angulo de Contacto	6
Figura 2-8. Perfil en correas normales.....	8
Figura 2-9. Masa suspendida de un muelle	11
Figura 2-10. Suma de vibraciones simples en el dominio del tiempo	11
Figura 2-11. Procesado FFT de una onda vibratoria compleja.....	12
Figura 2-12. Suma de vibraciones simples en el dominio de la frecuencia.....	13
Figura 2-13. Problemas de trasmisión por correas	13
Figura 2-14. Desalineamiento de poleas opuesto y angular.	15
Figura 2-15. Resonancia de banda o golpe de banda.....	15
Figura 2-16. Espectro de desalineación de poleas	16
Figura 2-17. Espectro de resonancia en correas	16
Figura 2-18. Puntos de Medición.....	17
Figura 3-1. Despiece del módulo de pruebas.....	24
Figura 3-2. Selección de perfil de correa.....	28
Figura 3-3. Diagrama de cuerpo libre.....	33
Figura 3-4. Simulación del factor de seguridad.....	38
Figura 3-5. Placa base.....	39
Figura 3-6. Montaje del motor jaula de ardilla	40
Figura 3-7. Montaje del alternador	41
Figura 3-8. Montaje de la correa trapezoidal.....	41
Figura 3-9. Tensado de la correa trapezoidal.....	42
Figura 4-1. Placa de desalineación paralela.....	44
Figura 4-2. Ángulo de desplazamiento de desalineación angular horizontal	45
Figura 4-3. Placa de desalineación angular	47
Figura 4-4. Ángulo de desplazamiento de desalineación angular vertical	47
Figura 4-5. Desalineación Angular vertical.....	49
Figura 4-6. Alineador Laser FAG SMARTY2	50
Figura 4-7. Equipo Vibracheck ABG 200	50
Figura 4-8. Foto tacómetro DT-2234C.....	51
Figura 4-9. Analizador de energía (Fluke 435-II)	51
Figura 4-10. Pinzas amperimétricas	52
Figura 4-11. Cámara FLIR E5	52
Figura 4-12. Reloj Comparador	53
Figura 4-13. Puntos de medición vibracional y Analizador de energía.....	53
Figura 5-1. Toma de datos con los respectivos equipos	72
Figura 5-2. Pruebas de Alineación Correcta de poleas.....	74

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 5-1. Frecuencia natural de la banda	73
Gráfico 5-2. Espectro de frecuencia natural del módulo.	74
Gráfico 5-3. Espectro característico.....	75
Gráfico 5-4. Espectros de desalineación paralela	77
Gráfico 5-5. Tendencia de la desalineación paralela vs. Rms total	82
Gráfico 5-6. Tendencia de la desalineación vs potencia.....	83
Gráfico 5-7. Mediciones de desalineación angular.....	83
Gráfico 5-8. Tendencia de la desalineación angular vs. Rms total	87
Gráfico 5-9. Tendencia de la desalineación Angular vs. Potencia	88
Gráfico 5-10. Medidas de desalineación angular vertical.....	89
Gráfico 5-11. Tendencia de la desalineación angular vertical vs. Rms total.....	93
Gráfico 5-12. Tendencia de la desalineación angular vertical vs. Potencia.....	94

LISTA DE ABREVIACIONES

CA	Corriente Alterna
A	Amperios
V	Voltaje
HP	Caballos De Poder
RMS	Nivel De Vibración Global (Valor Eficaz)
FFT	Trasformada De Fourier
W	Vatios
RPM	Revoluciones Por Minuto
AISI	Instituto Americano Del Hierro Y El Acero
AMEF	Análisis de Modo y Efecto de Fallos

LISTA DE ANEXOS

- A.** Guía de operación del módulo de pruebas.
- B.** Checklist del módulo de pruebas.
- C.** Guía de laboratorio de desalineación paralela.
- D.** Guía de laboratorio de desalineación angular horizontal.
- E.** Guía de laboratorio de desalineación angular vertical.
- F.** AMEF sistema de eléctrico.
- G.** AMEF sistema de transmisión.
- H.** AMEF del sistema de carga.
- I.** Plan de mantenimiento.
- J.** Manual de operación y guía de mantenimiento.
- K.** Características del acero AISI 1020.
- L.** Características y datos técnicos de los Equipos.
- M.** Planos del módulo simulador de falla

RESUMEN

El estudio realizado como trabajo de titulación, que tiene con objetivo la construcción de un módulo de pruebas para simular modos de falla en sistemas de transmisión de potencia con polea, aporta útilmente para la formación de los estudiantes de la Escuela de Ingeniería de Mantenimiento, debido a que el módulo construido permite realizar diferentes desalineaciones de poleas tales como: desalineación paralela, desalineación angular horizontal y desalineación angular vertical. En primera instancia para la construcción del módulo, se estableció una selección correcta de los elementos como: motor jaula de ardilla con una potencia de 1Hp, el alternador de 12 V y 32 A, que proporcionara la carga al sistema, la correa trapezoidal que trasmite el movimiento, y dos poleas con una relación de transmisión 1 a 1. Para provocar las distintas desalineaciones se elaboró la metodología para cada desalineación, además de un procedimiento detallado de la utilización de los equipos necesarios para el estudio. Posteriormente se realizó un análisis vibracional con el equipo Vibracheck 200 ABG, y el estudio de la calidad de energía con el equipo Fluke 435 II. Antes de provocar las distintas desalineaciones, el módulo debe estar en condiciones óptimas de funcionamiento, para tener un espectro característico que sirva como punto de partida para iniciar el desalineamiento. Con los valores obtenidos mediante las desalineaciones, se realizó graficas de tendencia, evidenciando mayor consumo energético e incremento del nivel de Vibración Global (RMS), a medida que el grado de desalineación aumenta, demostrando que el módulo cumple la función para la cual fue construido.

PALABRAS CLAVE: <SISTEMA DE TRASMISSION>, <CORREA TRAPEZOIDAL>, <ANÁLISIS DE VIBRACIONES>, <EFICIENCIA ENERGÉTICA>, <ESPECTRO CARACTERÍSTICO >, <MODOS DE FALLA>, <DESALINEACIÓN PARALELA>, <DESALINEACIÓN ANGULAR>.

ABSTRACT

The study aims to build a test module to simulate failure modes in pulley power transmission systems. This test module provides a useful training for students of Maintenance Engineering School due to module allows to carry out different pulley misalignments such as: parallel misalignment, horizontal/angular misalignment and vertical/angular misalignment. First, to build the module, an adequate items selection was established such as: a squirrel-cage motor with 1 Hp power, a 32 A - 12 volt alternator which will provide the system load, the movement is transmitted by the V-belt as well as two pulleys with a transmission ratio of 1:1. The methodology to make the different misalignment was developed, as well as a detailed procedure for the use of the equipment required for this study. Afterwards, a Vibration Analysis by using Vibracheck 200 ABG equipment and the energy quality study by using Fluke 435 II equipment were carried out. The module must ensure optimal operational conditions before to generate the different misalignments in order to have a characteristic spectrum as a starting point to start the misalignment. Trend Graph was made with the obtained values by means of the misalignments to show higher energy consumption as well as an overall vibration level (RMS) as the misalignment increases. It shows that the module performs the function for which it was designed.

KEYWORDS: <TRANSMISSION SYSTEMS>, <V-BELT>, <VIBRATION ANALYSIS>, <ENERGY EFFICIENCY>, <CHARACTERISTIC SPECTRUM>, <FAILURE MODES>, <PARALLEL MISALIGNMENT>, <ANGULAR MISALIGNMENT>.

CAPITULO I

1. GENERALIDADES

1.1 Antecedentes

Mediante los avances tecnológicos que el mundo presenta y por la necesidad de mantenimiento que se tiene en el campo industrial, la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo fundó la Escuela de Ingeniería de Mantenimiento con el propósito de formar excelentes profesionales en esta área, para así prestar sus servicios a industrias del país y del mundo.

Por tal motivo, la Carrera de Ingeniería de Mantenimiento tiene a disposición de los futuros profesionales, el Laboratorio de Diagnóstico Técnico y Eficiencia Energética, el cual cuenta con un módulo para simular modos de falla en sistemas de transmisión mediante polea.

Pero este módulo no permite realizar la simulación de los distintos modos de falla de forma real ya que no cuenta con un elemento que genere carga al sistema además de presentar dificultades para su operación debido a su gran tamaño y potencia (Intriago Nacevilla , y otros, 2011, pp.17-18).

Ante la problemática expuesta, se propone la construcción de un nuevo módulo, el cual para su funcionamiento requiere un motor eléctrico de 1 HP de potencia, que es relativamente baja y se encuentra fácilmente en el mercado.

El módulo propuesto, será de fácil operación y contará con un elemento que proporcionará carga al sistema para obtener datos reales de funcionamiento, potencializando y mejorando el aprendizaje del futuro profesional de Ingeniería de Mantenimiento.

Al identificar los modos de falla en estos sistemas de transmisión de potencia, se puede tomar acciones preventivas que disminuyan o eliminen sus efectos; mejorando la

Confiabilidad, Disponibilidad y Eficiencia Energética alcanzando así la vida útil de los elementos del sistema.

1.2 Justificación

La transmisión de potencia a través de poleas se genera por medio de una correa, este elemento es de material flexible y “permite el movimiento de la polea conductora a la conducida con una determinada potencia, producida por la fuerza de rozamiento” cuando se ponen en contacto la polea y correa (Higinio Rubio, 2011 pág. 2)

Este sistema de transmisión se utiliza en gran medida en el sector industrial, por lo cual es necesario realizar el análisis de los modos de falla en estos elementos, para tener así medidas preventivas para cuando estos aparezcan poder contrarrestarlos.

Por consiguiente, el presente trabajo busca como finalidad el construir un módulo de pruebas para realizar la simulación de modos de falla en sistemas de transmisión de potencia con polea. Modos de falla como: desalineación angular horizontal, desalineación paralela y desalineación angular vertical.

La Escuela de Ingeniería de Mantenimiento al contar con el módulo de pruebas para simular las fallas que pueden presentarse en el montaje, puesta en marcha y operación de estos sistemas de transmisión, permitirá a los estudiantes determinar de una manera efectiva y acertada los diversos problemas en la industria y así realizar un análisis adecuado para la eliminación o reducción de los modos de fallo.

1.3 Objetivos

1.3.1 *Objetivo general*

Construir un módulo de pruebas para simular modos de falla en sistemas de transmisión de potencia con polea para el Laboratorio de Diagnóstico Técnico.

1.3.2 *Objetivos específicos*

Seleccionar y ensamblar, correctamente los elementos que componen el módulo simulador de fallas

Simular los modos de falla como: desalineación paralela, desalineación angular horizontal, desalineación angular vertical.

Elaborar una metodología para provocar de manera correcta, la simulación de las distintas desalineaciones.

Realizar mediciones de Vibración y calidad de energía conforme aumenta la desalineación en cada uno de los modos de falla.

CAPITULO II

2. MARCO TÉORICO

2.1 Sistema de transmisión con polea-correa

Este sistema trasmite un movimiento giratorio de un eje a otro, y permite modificar sus características como sentido y velocidad. Por lo general los ejes son paralelos, pero el sistema también puede emplearse con ejes que se cruzan a 90° (Cejarosu, 2006, p.1).

“El sistema está compuesto por: un eje conductor, un eje conducido, dos poleas y una banda; también se les puede añadir otros componentes como el tensor de la banda para mejorar el comportamiento de este sistema” (Cejarosu, 2006, p.1).

2.1.1 Descripción de los elementos del sistema. Para (Cejarosu, 2006, pp.1-3) los elementos que componen el sistema de trasmisión son los siguientes, y se representan en la Figura 2-1.

- Eje conductor. - es el eje motriz, el que dispone del movimiento para poder transmitir al otro eje.
- Eje conducido. - es el eje el cual tiende a mover.
- Polea conductora. - es la que está unida al eje motriz.
- Polea conducida. - este elemento está unido al eje que se va mover (eje conducida).
- Correa o Banda. - es un elemento flexible que contiene a las poleas tanto conducida como conductora para así transmitir el movimiento una así la otra.

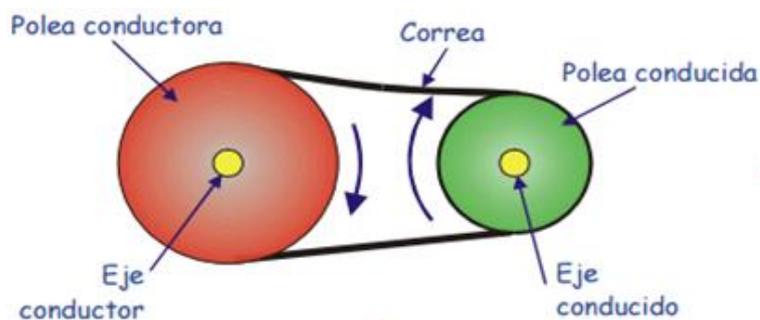


Figura 2-1. Elementos de sistema de trasmisión

Fuente: (Cejarosu, 2006)

2.1.2 Relación de velocidades. Según (Cejarosu, 2006, pp.2-3) “la transmisión de movimientos entre los dos ejes está en función de los diámetros de las dos poleas, cumpliéndose en todo momento la siguiente ecuación”:

$$D_1 \times N_1 = D_2 \times N_2 \quad (1)$$

Para lo cual define la relación de velocidad como:

$$I = \frac{N_1}{N_2} = \frac{D_2}{D_1} \quad (2)$$

Dónde:

D1: Diámetro Polea conductora.

D2: Diámetro Polea conducida.

N1: Velocidad de giro Polea conductora.

N2: Velocidad de giro Polea conducida.

Existe varias relaciones de velocidad que son importantes conocer para poder saber cuál es la relación correspondiente a este caso en estudio según (Cejarosu, 2006, p.3) las relaciones son la siguiente:

2.1.2.1 Aumento de velocidad de giro. Según (Cejarosu, 2006, p.3), “Si la Polea conductora tiene mayor diámetro que la conducida, la velocidad de giro aumenta”.

2.1.2.2 Disminución de velocidad de giro. Para (Cejarosu, 2006, p.3) “Si la Polea conductora es menor que la conducida, la velocidad de giro del eje conducido será menor que la del eje conductor”.

2.1.2.3 Mantenimiento de velocidad de giro. (Cejarosu, 2006, p.3) Manifiesta que al “trabajar con poleas de igual diámetro, la velocidad de giro de los dos ejes es idéntica”.

2.2 Poleas y sus características

“Una polea es una máquina simple que sirve para transmitir una fuerza. Se trata de una rueda, generalmente maciza y acanalada en su borde, que, con el curso de una cuerda o cable que se hace pasar por el canal, se usa como elemento de transmisión para cambiar la dirección del movimiento en máquinas y mecanismos” (Leonedis, 2012 pág. 1).

2.2.1 Partes de una polea. Las partes de una polea según (Higinio Rubio, 2011a: p10) son las siguientes :

- La llanta. - es el canal por la cual va recorrer la polea o correa.
- El disco.-es la parte que une la llanta con el cuerpo de la parte del hueco sirve en algunos casos para reducir el peso y que exista ventilación.
- El hueco. - es la parte donde se coloca el eje que trasmite el movimiento hacia la polea como ejemplo, el eje del sistema motriz.
- La chaveta- es el agujero donde se alojar la chaveta para que exista mayor agarre entre la polea y eje conductor.



Figura 2-2. Partes de una polea
Fuente: (Higinio Rubio, 2011)

2.2.2 Selección de los diámetros de las poleas. “Los diámetros de las poleas no deben ser inferiores a los mínimos recomendados por la práctica, para no doblar excesivamente las correas sobre las poleas, y con ello acortar su duración en servicio” (González Rey, 1999 pág. 20).

La tabla 2-1 nos indica los valores recomendados de diámetros primitivos en poleas

Tabla 2-1. Diámetros primitivos mínimos para poleas.

Perfil	A	B	C	D	SPZ	SPA	SPB	SPC
d min(mm)	76	137	229	330	71	100	160	250

Fuente: (González Rey, 1999)

2.3 Tipos de Bandas o Correas.

“La selección de la correa determina la capacidad de trabajo de toda la transmisión”, por eso, es importante conocer los tipos de correas de transmisión que existen. La clasificación según la sección transversal de la correa que menciona (Higinio Rubio, 2011a: pp.8-22) es la siguiente, y se visualiza en a figura 2-3

- Correas planas.
- Correas trapeciales o en “V” y (multi-V).
- Correas acanaladas o estriadas.
- Correas redondas.
- Correas reguladoras, sincronizadoras o dentadas.
- Correas hexagonales o en doble “V”.
- Correas eslabonadas.

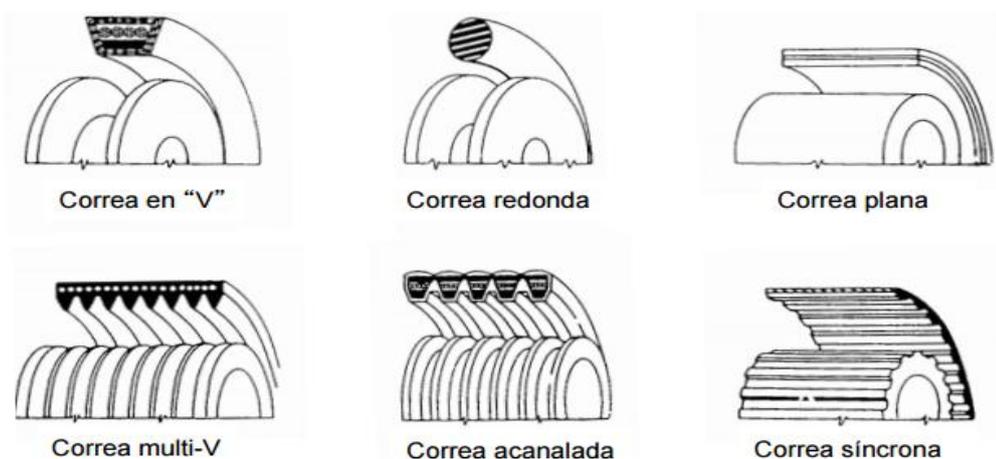


Figura 2-3. Tipos de correas

Fuente: (Higinio Rubio, 2011)

2.3.1 Correas en V. “Las correas en V al ser elementos flexibles en forma de trapecio, con una sección transversal son utilizadas debido a su gran versatilidad para transmitir

fuerza y movimiento, variando únicamente su sección y el número de correas necesarias” (Nieto et al., 1985: p.5).

Las zonas que constituyen una correa se indican en la figura 2-4 y según (Nieto et al., 1985: p.6) son:

- Zona de tensión: Al ser constituida por goma absorbe los esfuerzos de tracción durante la flexión de la correa.
- Zona Neutra: Esta sección de la correa se ubica en la parte central y está conformada por una o varias cuerdas inextensibles, que le dan resistencia a la correa para soportar la carga que se le aplica e impedir la deformación por alargamiento de la correa.
- Zona de compresión: Está constituida por goma que le da una capacidad para dar rigidez lateral necesaria y absorber esfuerzos de compresión cuando se flexiona la correa alrededor de la polea.

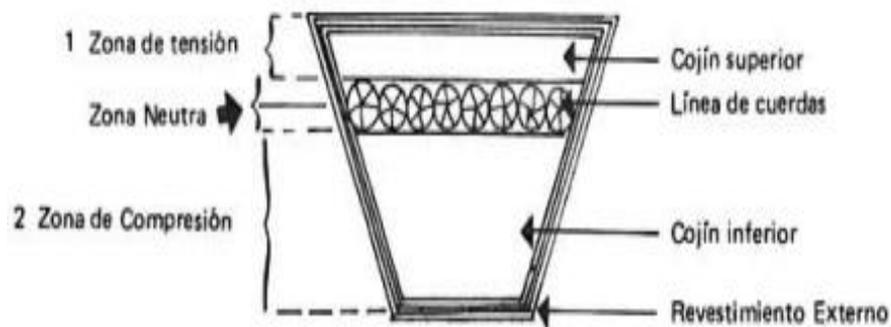


Figura 2-4. Zonas de correas en "V"

Fuente: (Nieto, y otros, 1985)

2.3.2 Clase de correas en V. Existen diversas clases de correas en V, las cuales se debe seleccionar en base a “la máquina a la que se asigne y la potencia que se requiere que la correa transmita”, dependiendo de la utilización, según (Nieto et al.,1985:p.7), se clasifican en :

- Lados planos.
- Lados cóncavos.
- Con dentado interior.
- Para velocidad variable.
- Doble V.

- Para unir con juntas.
- Eslabonada.
- Dentada para poleas dentadas (Sincrónica).

2.3.2.1 *Correa sin fin de lados planos*. “Esta correa es la más común, debido a la adaptación que muestra a los requerimientos de transmisión por enlace flexible”, la forma característica de esta correa se muestra en la figura 2-5 (Nieto, et al., 1985: pp.5-10).

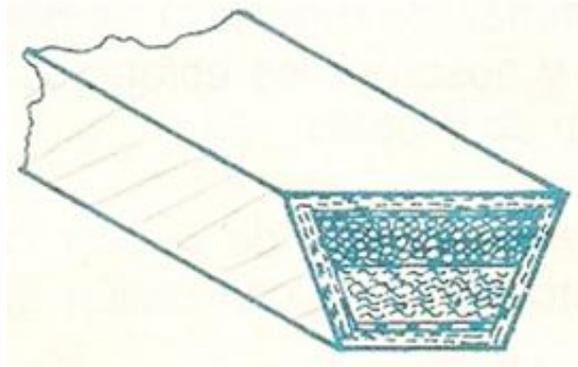


Figura 2-5. Correa sin fin de lados planos
Fuente: (Nieto, y otros, 1985)

2.3.3 *Geometría de la transmisión de correa*. “Una transmisión de correa suministra una razón de velocidad constante entre los ejes respectivos” (Myszka, 2012, p.304). En la figura 2-6, se observa un diagrama de la geometría básica de una transmisión de correa.

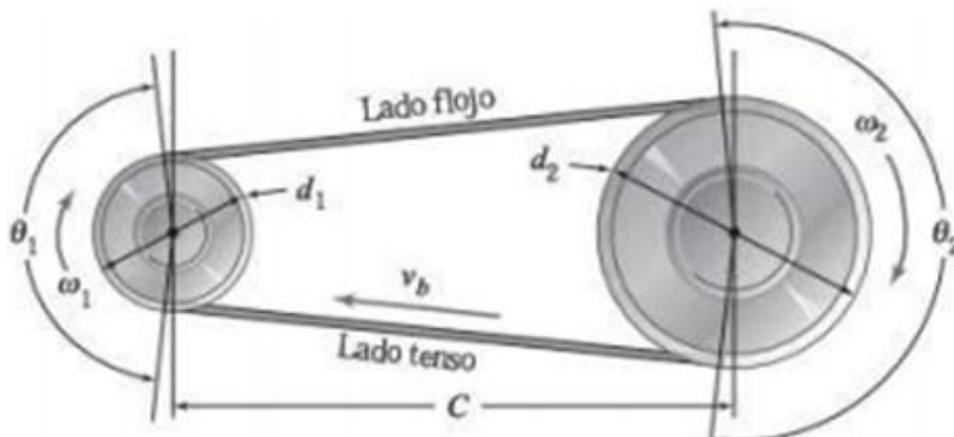


Figura 2-6. Geometría de la transmisión de correas
Fuente: (Myszka, 2012)

Los parámetros que se utilizan para la selección de una correa según (Myszka, 2012, p. 304) son los siguientes:

2.3.3.1 *Distancia entre centros.* “Esta distancia entre centros C es la distancia entre el centro de las poleas impulsora e impulsada, así también es la distancia entre los dos ejes acoplados por la transmisión de correas” (Myszka, 2012, p.04).

La distancia normal entre centros para correas en V deberá estar en el rango de:

$$d_2 < C < 3 (d_1 + d_2) \quad (3)$$

Dónde:

d_1 : Diámetro de la polea 1 (conductora).

d_2 : Diámetro de la polea 2 (conducida).

C : Distancia entre centros

2.3.3.2 *Longitud de la correa.* La longitud de la correa se calcula relacionado la distancia entre centros, y los diámetros de paso (Myszka, 2012, p 304).

$$L = 2C + \frac{\pi}{2}(d_2 + d_1) + \frac{(d_2 - d_1)^2}{2C} \quad (4)$$

Donde según (Nieto et al., 1985: p.5-10):

L = Longitud de la correa (mm)

C =Distancia entre centros (eje)

$1,57 = \pi/2 =$ contante de cálculo

d_2 =Diámetro primitivo de la polea mayor

d_1 =Diámetro primitivo de la polea menor

Para calcular la distancia entre centros aplicamos la ecuación 5,

$$C = \frac{B + \sqrt{B^2 - 32(d_2 - d_1)^2}}{16} \quad (5)$$

Dónde:

B: es el factor que relaciona los diámetros de las poleas en el sistema, mediante la siguiente ecuación.

$$B = 2\pi(d_2 + d_1) \quad (6)$$

2.3.3.3 *El ángulo de contacto.* “Es la medida del acoplamiento angular de la correa sobre cada polea” (Myszka, 2012, p.304), como se indica en la figura 2-7, y se calcula para cada polea con la ecuación 7.

$$\theta_1 = 180^\circ - 2 \sin^{-1} \left\{ \frac{d_2 - d_1}{2a} \right\} \quad (7)$$

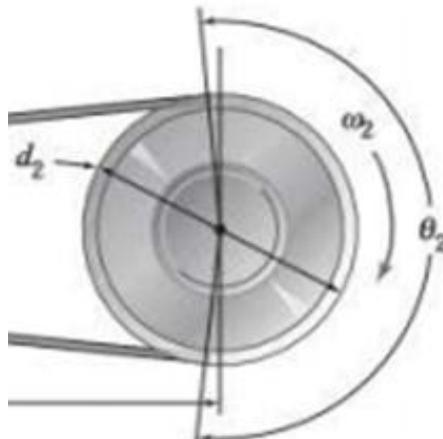


Figura 2-7. Ángulo de Contacto
Fuente: (Myszka, 2012)

2.3.3.4 *Potencia nominal real que se puede transmitir por una correa.* La tabla 2-2, según (Myszka, 2012, p.305) “muestra el porcentaje de potencia nominal real que se puede transmitir por una correa, que funciona sobre una polea con un ángulo de contacto menor de 180”. Los fabricantes de correas sugieren mantener el ángulo de contacto mayor de 120° cuando sea posible.

Tabla 2-2. Reducción de la capacidad de potencia por el ángulo de contacto

Ángulo de contacto θ	180°	160°	140°	120°	100°	80°
Capacidad Real (% de potencia nominal)	100	95	89	82	74	63

Fuente: (Myszka, 2012)

2.3.3.5 *Potencia corregida.* “En la industria el contexto operacional de cada máquina depende de la función o trabajo que este deba realizar”, por tal razón se utiliza la ecuación 7, que corresponde a la potencia corregida en donde interviene la potencia del motor conductor, y el factor o coeficiente de servicio (Ozaeta Eidelman et al., 2013: p. 30-35).

$$P_c = P_n \times f_s \quad (8)$$

Dónde:

P_n : Potencia nominal de salida.

f_s : Factor de Corrección de la potencia (Factor de Servicio)

2.3.3.6 *Selección del factor de servicio.* “Es un factor que prevé los incrementos de carga que se producen en las correas, de acuerdo con los diferentes tipos de máquinas en las que se utiliza la transmisión, con la cantidad de horas diarias de trabajo y con la relación de transmisión que se desea” (Ozaeta Eidelman et al., 2013: p.35),

A continuación se exponen la tabla 2-3 necesaria para la selección del factor de servicio.

Tabla 2-3. Factor De Servicio.

Máquina Accionada		Máquina Motriz					
Clase	Ejemplos	Motores eléctricos (C.A. de arranque suave C.D. con arrancador estrella delta, C.D. Shunt), motores de combustión interna con más de 4 cilindros, máquinas con acoples flexibles.			Motores eléctricos (C.A. de arranque directo, C.D. serie y compuesto). Máquinas de combustión interna con menos de 4 cilindros.		
		Horas de trabajo diarias			Horas de trabajo diarias		
		<10	10 a 16	>16	<10	10 a 16	>16
(Servicio ligero)	Agitador (densidad uniforme).	1	1,1	1,2	1,1	1,2	1,3
	Ventilador y Soplador (<7,5 kW).						
	Compresor y Bomba centrífuga.						

Fuente: (Ozaeta Eidelman, y otros, 2013)

2.3.3.7 *Tamaño del perfil en correas normales.* “La selección del perfil debe corresponder con las disponibilidades prácticas del tipo de perfil elegido”, para lo cual se hace referencia en la figura 2-8 (González Rey, 1999, p.18).

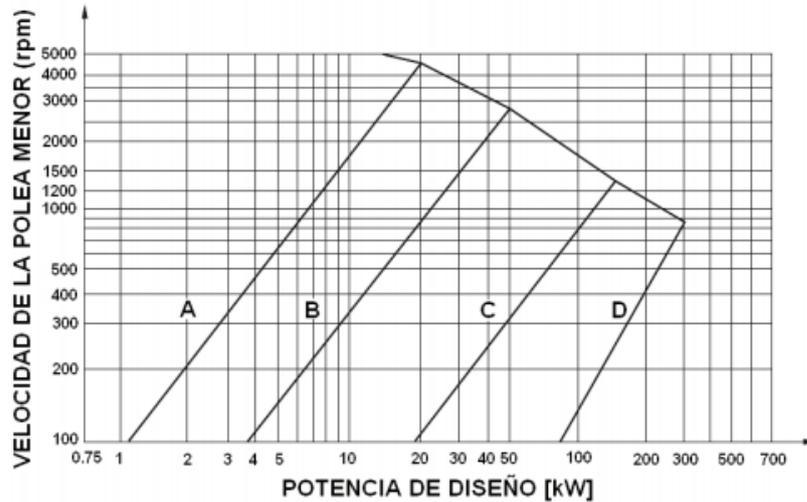


Figura 2-8. Perfil en correas normales
Fuente: (Ozaeta Eidelman, y otros, 2013)

2.3.3.8 *Determinación de la potencia nominal transmisible por correa.* Para determinar la potencia que es capaz de transmitir la correa (Ozaeta Eidelman et al., 2013: p.4) recomienda utilizar la ecuación 9:

$$N_1 = d * r \left[K_1 - \frac{K_2}{d} - K_3 * (d * r)^2 - K_4 * \log(d * r) \right] + k_2 * r * \left(1 - \frac{1}{K_i} \right) \quad (9)$$

Dónde:

- N1: Potencia transmisible por correa [kW].
- d: Diámetro primitivo de la polea menor [mm].
- r: Frecuencia de rotación de la polea más rápida [rpm] dividida por mil.
- K1, K2, K3, K4: Factores empíricos calculados por los fabricantes de transmisiones por correa trapecial (tabla 2-4).
- Ki: Factor por razón de transmisión.

Tabla 2-4. Factor empírico según el factor de correas

FACTOR EMPÍRICO (K₁, K₂, K₃ y K₄) SEGÚN EL PERFIL DE LA CORREA				
Perfil	K₁	K₂	K₃	K₄
A	0,041	1,954	1,32*10	0,0036
B	0,065	4,361	2,18*10	0,0056
C	0,108	10,22	3,70*10	0,010
D	0,199	29,35	7,10*10	0,017

• Fuente: (Ozaeta Eidelman, y otros, 2013)

El factor K_i se determina con la ecuación 10 (Ozaeta Eidelman ET AL., 2013, p.6):

$$K_i = \frac{1}{1 + 0,35 \cdot \log \left[\frac{1 + 10 \left\{ - \left(\frac{1}{0,35} \right) \left(1 - \frac{1}{i} \right) \right\}}{2} \right]} \quad (10)$$

Dónde:

- i es la razón de transmisión.

2.3.3.9 *Determinación de la cantidad total de correas necesarias.* En un sistema de transmisión mediante banda – polea, es necesario conocer la cantidad necesarias de correas, para ello se utiliza la ecuación 11 (Tulio Piovan, 2013, p.6):

$$Z = \frac{P_c}{N_0 \cdot C_2 \cdot C_3} \quad (11)$$

Siendo según (Tulio Piovan, 2013, p.6):

- Z: Cantidad de correas necesarias
- P_c: Potencia Corregida
- N₀: Potencia trasmisible Tabla 2-4
- F_s.: Factor de servicio Tabla 2-3
- C₃: Factor de corrección Tabla 2-5

Donde, para conocer el valor del factor de corrección C3, es necesario considerar el arco de contacto entre la correa y las poleas debido a que este sistema trabaja por roce, limitando así la capacidad de transmisión (Tulio Piovan, 2013, p. 6).

Utilizando los valores de Dp1 y Dp2 se consulta la Tabla 2-5, obteniendo así el valor de C3.

Tabla 2-5. Valores de C3

(Dp2-Dp1) /Cd	0.00	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70
Arco de contacto	180°	174°	169°	163°	157°	151°	145°	139°
Factor de corrección	1,00	0,99	0,97	0,96	0,94	0,93	0,91	0,89
(Dp2-Dp1) /Cd	0,80	0,90	1,00	1,10	1,20	1,30	1,40	0,00
Arco de contacto	133°	127°	120°	113°	106°	99°	91°	0,00
Factor de corrección	0,87	0,85	0,82	0,80	0,77	0,73	0,70	0,00

Fuente: (Tulio Piovan, 2013)

2.4 Análisis Vibracional

“Se considera que la vibración es un movimiento repetitivo de un objeto alrededor desde una posición de equilibrio hasta una posición máxima, la posición de equilibrio es la que llega cuando la fuerza que actúa sobre él sea cero” (White, 2010, p.16).

2.4.1 Vibración simple. “La base principal de las señales de vibración en el dominio del tiempo son las ondas sinusoidales. Estas son las más simples y son la representación de las oscilaciones puras” (Sinais, 2013, p.3).

Una oscilación pura puede representarse físicamente con el siguiente experimento:

La Figura 2-9 muestra una masa suspendida de un muelle, si esta masa es soltada desde una distancia A, en condiciones ideales, se efectuará un movimiento armónico simple que tendrá una amplitud A (Sinais, 2013, p.3).

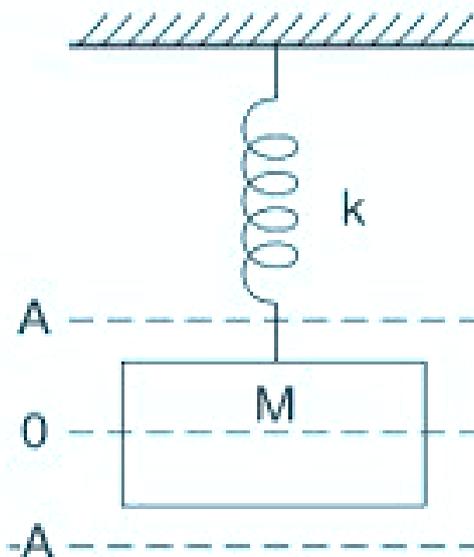


Figura 2-9. Masa suspendida de un muelle
Fuente: (Sinais, 2013).

2.4.2 Vibración compuesta. “La vibración compuesta se presenta al sumar varias vibraciones simples, como por ejemplo en una maquina la vibración está compuesta de una serie de vibraciones simples asociadas a sus componentes internos en movimiento. Teniendo esto en cuenta, se deduce que la forma de onda de vibración de una máquina no es una señal sinusoidal, sino que puede llegar a ser muy compleja” (Sinais, 2013, p.4).

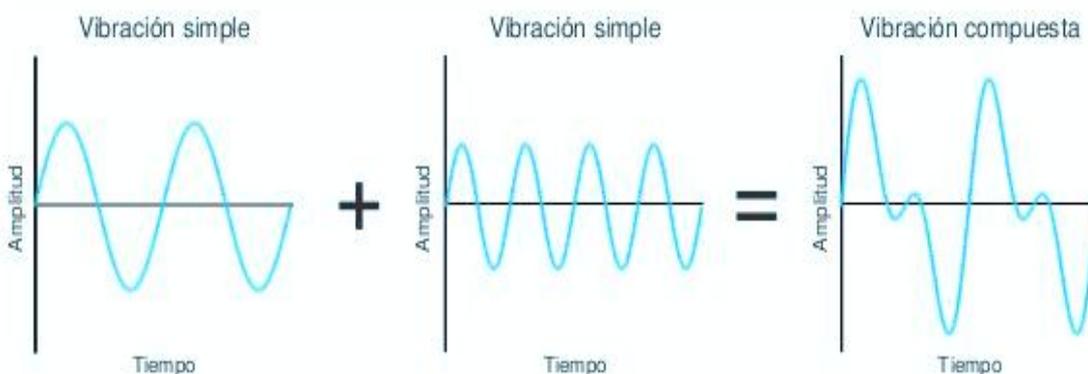


Figura 2-10. Suma de vibraciones simples en el dominio del tiempo
Fuente: (Sinais, 2013)

2.4.3 Transformada de Fourier. “Las vibraciones en el dominio del tiempo plasman la información acerca del comportamiento de cada componente de la máquina, sin embargo, esto representa un problema a la hora de realizar el diagnostico. Debido a que estas señales contienen mucha información de forma compleja resultando difícil distinguir a simple vista sus comportamientos característicos” (Sinais, 2013, p.6).

“Ante esto existe una forma más fácil de realizar el estudio de las vibraciones, esto es analizándolas en el dominio de la frecuencia, empleando la gráfica de la amplitud frente a la frecuencia que se la conoce con el nombre de espectro” (Sinais, 2013, p. 6).

“Lo que hace un analizador de espectros es trabajar con la transformada rápida de Fourier que es captar una señal de una máquina, calcular todas las series de señales sinusoidales presentes en la señal compleja y mostrarlas de forma individual en una gráfica de espectro” (Sinais, 2013, p.6).

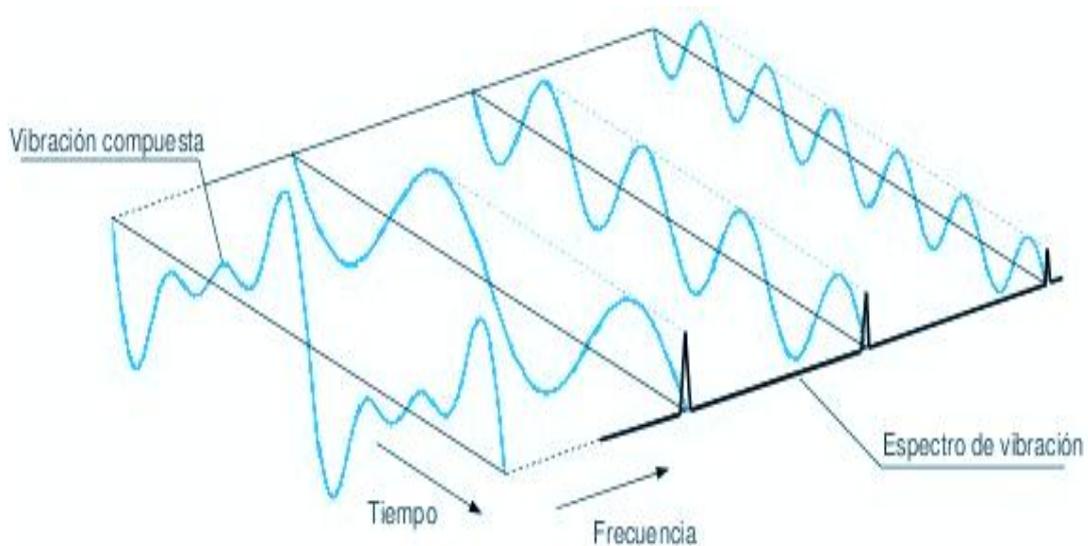


Figura 2-11. Procesado FFT de una onda vibratoria compleja.
Fuente: (Sinais, 2013)

“Como se puede observar en la Figura 2-11, existen tres dimensiones puede verse claramente la señal de vibración compuesta, capturada desde una máquina. A dicha señal se le calculan todas las señales sinusoidales en el dominio del tiempo que la componen y por último se muestra cada una de ellas en el dominio de la frecuencia” (Sinais, 2013, p.6).

“Por tanto, empleando la transformada de Fourier, se puede retomar la suma de vibraciones simples de la Figura 2-10 y representar exactamente la misma operación en el dominio de la frecuencia como se muestra en la Figura 2-12, con la particularidad de que en este caso resulta obvio obtener las frecuencias y amplitudes de las dos componentes originales a partir del espectro resultante” (Sinais, 2013, p.6).

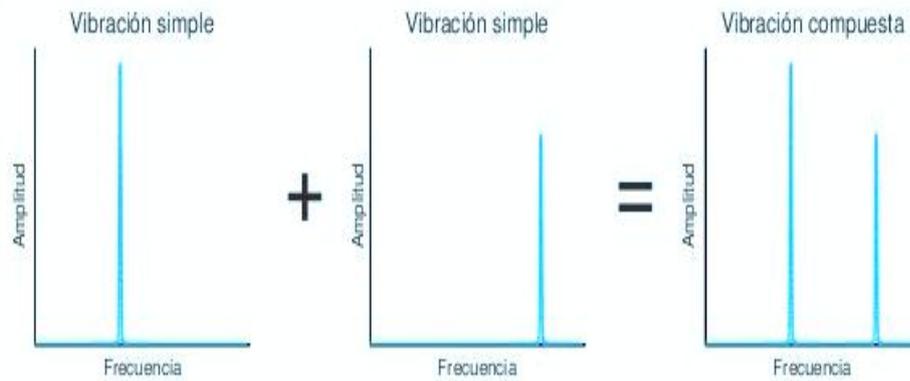


Figura 2-12. Suma de vibraciones simples en el dominio de la frecuencia

Fuente. (Sinais, 2013)

2.4.4 Frecuencia natural. “Esta frecuencia depende de las características de la maquina como son la rigidez, masa y su amortiguación. Si esta frecuencia natural es excitada por un agente externo esta se incrementa causando perjuicios que podrían llegar hacer hasta catastróficos esto se lo conoce como resonancia” (White, 2010, p.27).

2.4.5 Resonancia. “La resonancia es un estado de operación en el que una frecuencia de excitación se encuentra cerca de una frecuencia natural de la estructura de la máquina”. “Cuando ocurre la resonancia, los niveles de vibración que resultan pueden ser muy altos y pueden causar daños muy rápidamente”(White, 2010, p.28).

2.4.6 Diagnóstico de bandas en sistemas de transmisión. Los sistemas de transmisión por bandas tienen una serie de problemas, y los podemos diagnosticar mediante las cartas de Charlotte como se indica en la figura 2-13.

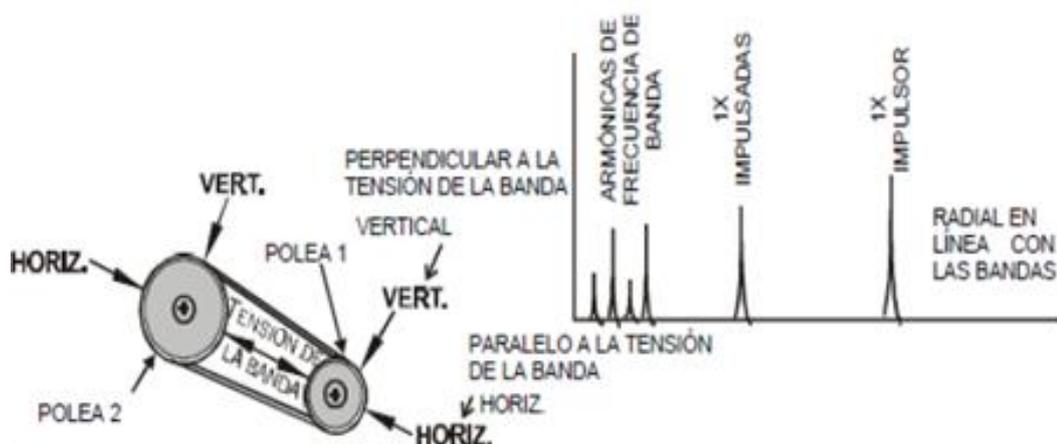


Figura 2-13. Problemas de transmisión por correas

Fuente: (CHARLOTTE., 1996)

“Las frecuencias de las bandas se encuentran debajo de las RPM del motor o de la máquina impulsada. Cuando están desgastadas, flojas o mal colocadas, por lo regular causan de 3 a 4 múltiplos de frecuencias de bandas” (CHARLOTTE., 1996 pág. 5).

“A menudo la frecuencia de banda 2X es el pico dominante. Por lo regular, las amplitudes son inestables, algunas veces emiten pulsaciones por cercanía con frecuencias del motor y del equipo conducido” (CHARLOTTE., 1996, p.5).

La ecuación que menciona (CHARLOTTE., 1996, p.5), para calcular la frecuencia fundamental de la banda (FFB) es la siguiente:

$$FFB = \frac{3,142 \times RPM \text{ POLEA } \times DIAMETRO \text{ PRIMITIVO}}{LONGITUD \text{ DE LA BANDA}} \quad (12)$$

2.5 Modos de falla

Un modo de falla se presenta cuando una maquina o equipo no cumple con la función a la cual se fue encomendada lo cual repercute mucho en una empresa o industria. En el sistema de transmisión de banda y polea existe varias maneras de fallar ya sea desde la misma banda, así como también la parte motriz.

2.5.1 Modos de falla en sistemas de transmisión mediante Banda-Polea. Los espectros indican en una forma simplificada la presencia de modos de falla en un sistema para así tomar acciones correctivas o preventivas dependiendo el caso.

A continuación, detallas los diferentes espectros de modos de falla en transmisión mediante polea.

2.5.1.1 Desalineación de poleas. La desalineación de poleas es un serio problema en las industrias que cuentan con estos sistema, ya que aumentas los gastos debido a estos modos de falla, por ello mediante análisis vibracional podemos diagnosticarlos a tiempo.

“La desalineación de poleas genera fuertes componentes axiales 1x y armónicos axiales de la frecuencia fundamental de la banda” (White, 2010, p.129).

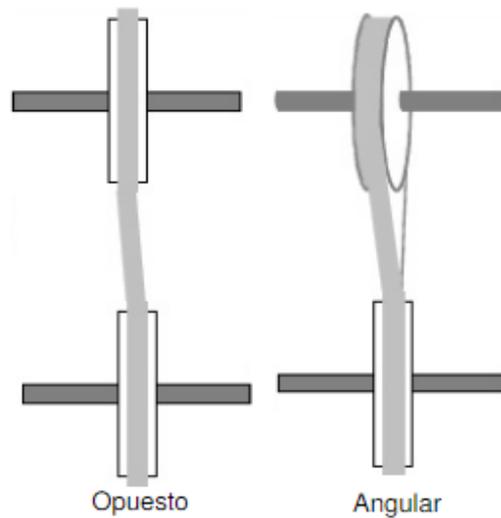


Figura 2-14. Desalineamiento de poleas opuesto y angular.
Fuente: (White, 2010)

2.5.1.2 *Resonancia de banda o golpe de banda.* “Se dice que una fuerte vibración con onda estática, de las bandas es una indicación de una tensión incorrecta. No se deben usar en inactivos cargados con resortes, ya que agregan un sistema de resonancia al sistema de banda que ya es complejo de por sí, y por lo general causan más problemas que los que resuelven. Una tensión de banda desigual en sistemas de bandas múltiples causa altas cargas radiales en los rodamientos” (White, 2010, p.129).

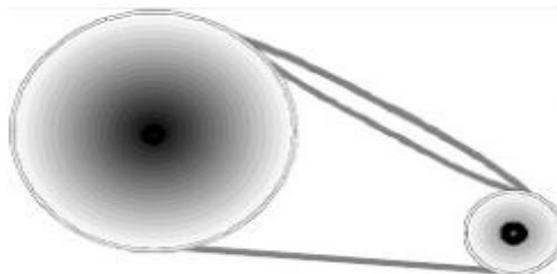


Figura 2-15. Resonancia de banda o golpe de banda
Fuente: (White, 2010)

2.5.1.3 *Espectro de desalineación en poleas.* “La desalineación de la polea produce alta vibración a $1X$ RPM predominantemente en la dirección axial. El radio de las amplitudes de las RPM de la polea conductora a la conducida depende de donde se toman los datos, así como de la masa relativa y la rigidez del bastidor.

A menudo con la desalineación de la polea la vibración axial más elevada se encontrará a las RPM del ventilador, o vice versa. Puede ser confirmada por mediciones de fase

colocando el Filtro de Fase a las RPM de la polea con mayor amplitud axial; luego compare las fases a esta frecuencia en particular en cada rotor en la dirección axial” (CHARLOTTE., 1996, p.5).

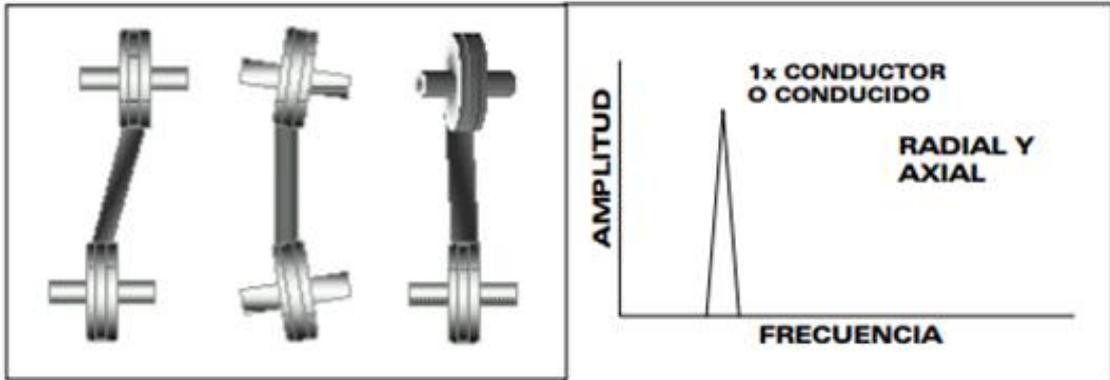


Figura 2-16. Espectro de desalineación de poleas
Fuente: (A-MAQ. S.A., 2005)

2.5.1.4 *Espectro de resonancia en correas.* “La Resonancia de la Correa puede ocasionar amplitudes altas si la frecuencia natural de la correa llega a aproximarse, o coincidir ya sea con las RPM del motor o de la máquina. La frecuencia natural de la correa puede ser alterada cambiando la tensión, longitud o sección transversal de la correa” (A-MAQ. S.A., 2005, p.30).

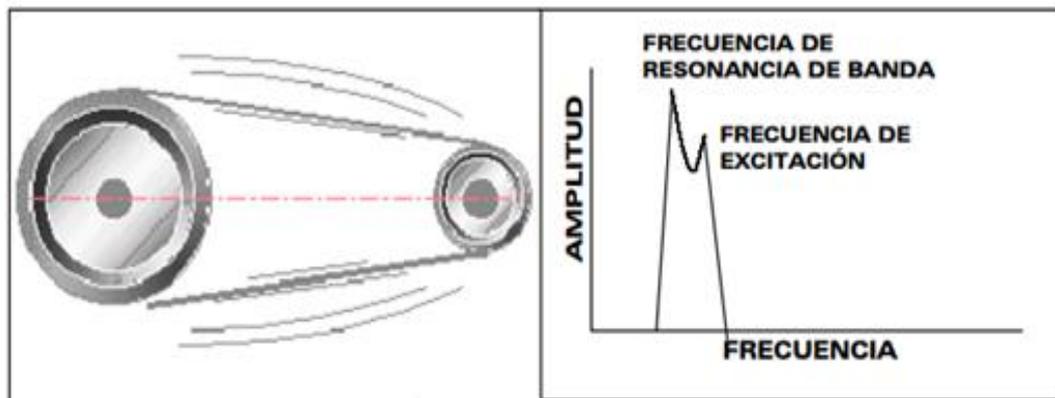


Figura 2-17. Espectro de resonancia en correas
Fuente: (A-MAQ. S.A., 2005)

2.5.2 *Puntos de Medición.* Los puntos de ubicación de los sensores de vibración según la norma (ISO-10816-1) se debe colocar en sentido axial , radial vertical y radial horizontal según el caso

Para tomar mediciones en los diferentes sentidos antes mencionados, se detalla a continuación en la figura 2-18.

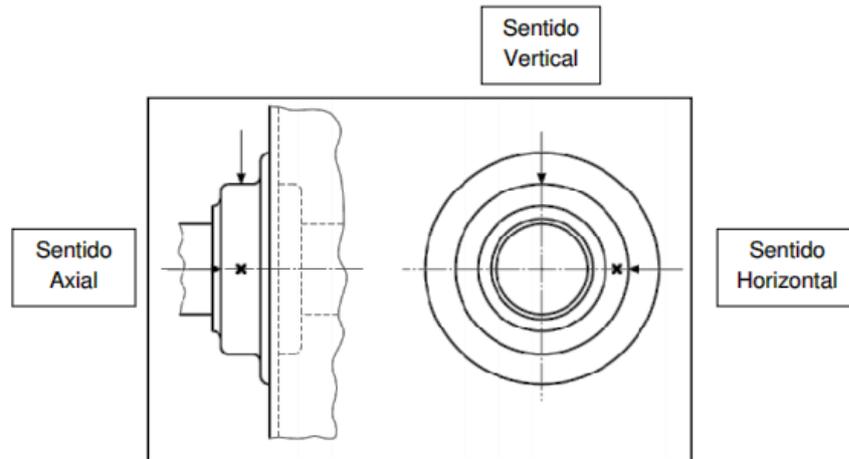


Figura 2-18. Puntos de Medición
Fuente: (ISO-10816-1)

2.6 Carga en motores eléctricos Trifásicos.

La carga, es un aspecto muy importante al momento de la selección de un motor, ya que, mediante esta, se considera la potencia y velocidad a la cual girara el motor, tomando en consideración este parámetro se realizar una selección correcta.

2.6.1 Potencia de entrada nominal. Para calcular la potencia del motor eléctrico trifásico de CA, se utiliza la ecuación 13 según (NTE INEN 2498, 2009, pp.7-10).

$$P_{e \text{ nominal}} = \sqrt{3} \times V \times I \times \text{Cos } \varphi \quad (13)$$

Dónde:

P_{em} = Potencia entrada nominal

V= Voltaje nominal

I= Intensidad nominal

Cos φ = Factor de potencia

2.6.2 Potencia mecánica. Esta potencia la tenemos presente en el eje del motor eléctrico trifásico de corriente alterna para la cual se puede calcular según (NTE INEN 2498, 2009, pp9-12) con la ecuación 14

$$\mathbf{Pm} = \frac{\mathbf{T \times N}}{9549} \quad (14)$$

Donde según (NTE INEN 2498, 2009 pág. 9):

T= Par torsor en el eje del motor eléctrico [N.M].

N= Velocidad angular del motor eléctrico [RPM].

2.6.3 Par de torsión del sistema de transmisión. “El par de torsión se calcula dependiendo de la potencia y la frecuencia a la cual está trabajando dicho motor trifásico, mediante estas especificaciones la ecuación para calcular el par torsor según (Cardona, 2010 págs. 67-69) es la siguiente:

$$\mathbf{Tn} = \frac{60 \mathbf{P}}{2\pi(\mathbf{n})} \quad (15)$$

Donde según (Cardona, 2010 págs. 67-69)

P = Potencia del motor [W]

n = Velocidad del giro del motor [rpm]

CAPITULO III

3. SELECCIÓN Y MONTAJE DE ELEMENTOS DEL MÓDULO

En este capítulo se presenta los elementos necesarios para el montaje del módulo de pruebas, para simulación de modos de falla en sistemas de transmisión de potencia por correa, para lo cual se ejecuta el montaje de estos elementos utilizando el software SOLIDWORKS 2017. A la vez para sustentar la selección de estos elementos se realizará los cálculos correspondientes.

3.1 Módulo con sus elementos principales

La figura 3-2 indica un total de trece elementos principales el módulo de pruebas que más detalladamente se especifica en la tabla 3-1.

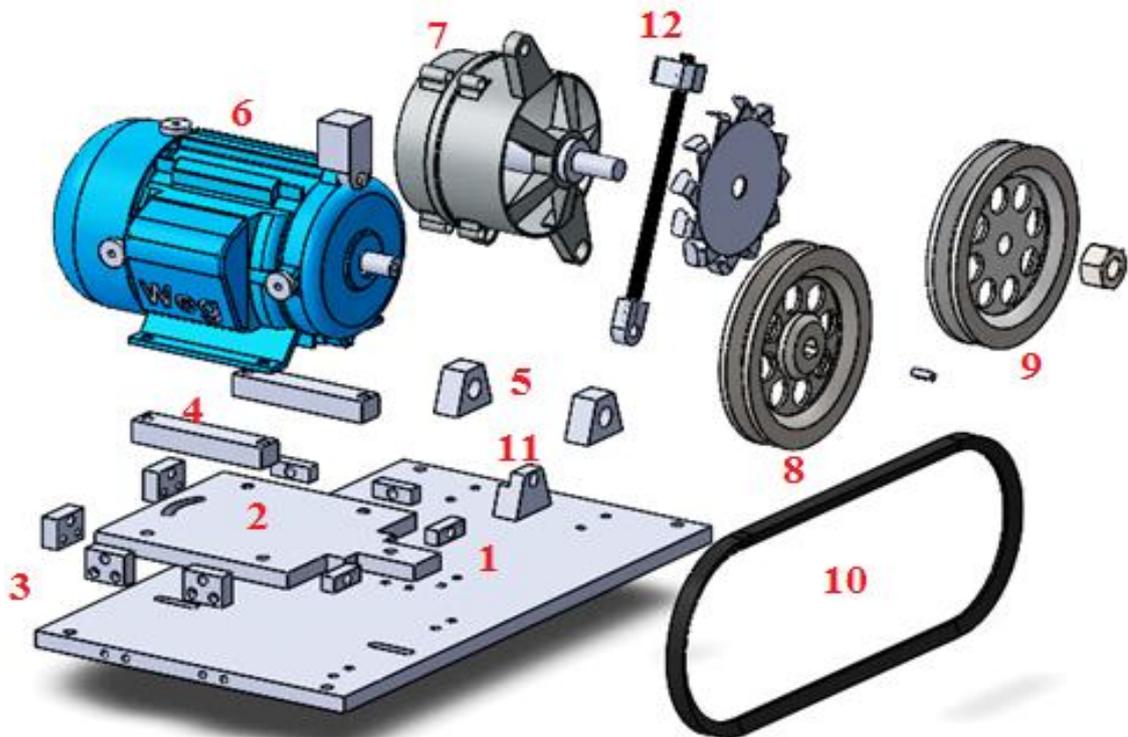


Figura 3-1. Despiece del módulo de pruebas.

En la tabla 3-1 se detalla la cantidad y descripción de cada elemento que se requiere para la construcción del módulo para simular modos de falla.

Tabla 3-1. Cantidad necesaria de cada elemento.

NO	Cantidad	Descripción
1	1	Placa base
2	1	Placa Para desalineación
3	8	Bases para pernos de desalineación
4	2	Base del motor eléctrico
5	2	Base del alternador
6	1	Motor eléctrico
7	1	Alternador
8	1	Polea del Motor
9	1	Polea del alternador
10	1	Banda trapezoidal
11	1	Base Tensor de polea
12	1	Tensor de polea

3.2 Selección de elementos del módulo de prueba.

3.2.1 Selección del motor eléctrico. Al ser un módulo didáctico se debe tener en consideración aspectos como la seguridad en el momento de su operación por parte de los estudiantes, ante lo cual se ha procedido con la selección de un motor eléctrico asincrónico jaula de ardilla marca WEG de una potencia de 1HP con una velocidad nominal aproximada a 3600; debido a que proporciona características como bajo costo, bajo mantenimiento y fácil adquisición en el mercado.

3.2.1.1 Características del motor eléctrico. El motor eléctrico seleccionado para las simulaciones de modos de falla posee las siguientes características detalladas en la tabla 3-2.

Tabla 3-2. Características del motor eléctrico

Características	Especificación
Marca	WEG
Modelo	TE1BFOX01
Frecuencia	60HZ
Potencia	1HP
Voltaje Nominal	220/440 V
Corriente nominal	3,00/1,50 A
Corriente de arranque	6 A
Temperatura	40 °C
Polos	4
Par nominal	2,10 N.m
Rendimiento	77 %
Velocidad Nominal	3410rpm

3.2.2 Selección del alternador. Debido a la necesidad de proporcionar un elemento de carga real al sistema, se procede a la selección de un alternador cuyas características lo hacen idóneo para la realización de las pruebas en el módulo.

3.2.2.1 *Características del alternador.* En la tabla 3-3 detallamos las características principales del alternador que se utiliza en el módulo.

Tabla 3-3. Características del Alternador

Características	Especificación
Marca	Yokobo
Modelo	23100-U0100
Voltaje	12V
Intensidad	35A

3.2.3 Selección de poleas. Para la selección de las poleas se ha tomado en consideración un criterio importante como es la alineación de estos elementos, por lo cual, al contar con un alineador laser de poleas en el laboratorio de diagnóstico técnico, para su óptima utilización se necesita una base de apoyo de un material ferromagnético, así como de un área considerable para la sujeción a la polea.

Con los requerimientos expuestos, se decide construir poleas de un diámetro de 140 mm, según la tabla 1 se elige el tipo A, y de un material de Acero AISI 1020 debido a la alta maquinabilidad que ofrece este metal, su alta resistencia al desgaste y su fácil adquisición.

Se considera también que tanto la polea conducida y conductora sean del mismo diámetro para permitir una versatilidad en la utilización del alineador de poleas, pudiendo ser colocado en cualquiera de las dos poleas, dando una mayor precisión al momento de realizar la alineación de las mismas.

3.2.3.1 *Diámetro de la polea conducida y conductora.* Como se menciona anteriormente, el diámetro de la polea conducida como conductora es igual, esto permite la colocación del alineador laser de poleas tanto en el eje motriz como en el eje conducido, teniendo así una relación de transmisión $i=1$.

3.2.3.2 *Características de la polea.* El sistema de transmisión cuenta con dos poleas de igual características y de un mismo material como se menciona a en la tabla 4-3.

Tabla 3-4. Características de la polea conducida y conductora

Características	Especificación
Diámetro	140 mm
Tipo de Polea	A
Material	Acero AISI 1020

3.2.3.3 *Relación de transmisión del eje motriz y eje conducido.* Para el cálculo de la relación de transmisión se utiliza la ecuación 2, donde se conoce que el diámetro tanto de la polea conducida como de la conductora son iguales.

$$I = \frac{N_1}{N_2} = \frac{D_2}{D_1}$$

$$I = \frac{14}{14}$$

$$I = 1$$

3.2.4 Selección de la correa. Para seleccionar la correa se toma en cuenta las ventajas que brinda la correa trapezoidal, así también se debe tomar en cuenta los cálculos adecuados para una correcta selección:

3.2.4.1 *Potencia corregida.* Para el cálculo de la potencia corregida se toma como referencia la ecuación 8, donde el factor servicio (f.s) es de 1,0 debido a que trabaja a menos de 10 horas, y una potencia nominal (Pn) menor a 7,5 kW, con arranque suave proporcionado por un variador de frecuencia estos valores son obtenidos de la tabla 2-3.

$$P_c = P_n * f_s$$

$$P_c = 0,75 * 1,0$$

$$P_c = 0,75 \text{ kW} = 1 \text{ HP}$$

3.2.4.2 *Selección del perfil de correa.* Para la selección del perfil de la correa se utiliza la figura 2-8, conociendo que el sistema trabaja a una potencia de 0,74 kW, a una velocidad alrededor de 3600 rpm, dando como resultado una correa tipo “A”, como se observa en la figura 3-2.

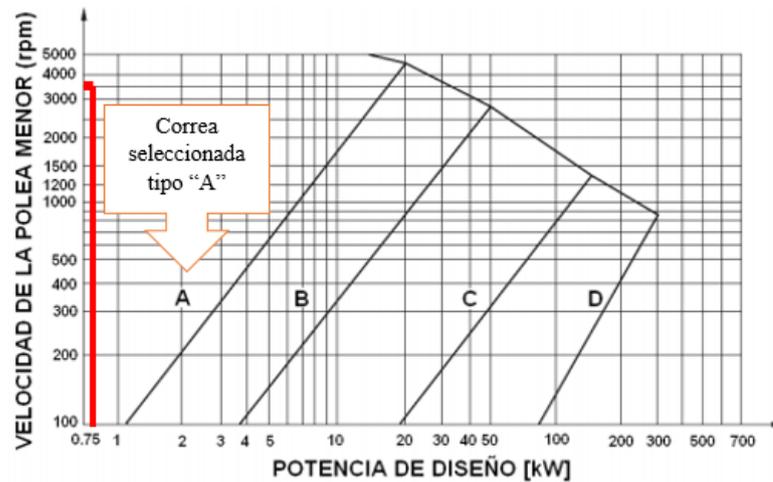


Figura 3-2. Selección de perfil de correa

3.2.4.3 *Límite de distancia entre centros.* Para calcular el límite entre centros (C) se toma de referencia la ecuación 3, donde se muestra que mediante este cálculo la distancia entre centros puede estar entre un rango de 140 a 840 mm.

$$d_2 < C < 3 (d_t + d_2)$$

$$140 < C < 3 (140 + 140)$$

$$140 < C < 840$$

3.2.4.4 *Longitud primitiva de la correa.* La longitud primitiva de correa (L) se obtiene en base a la ecuación 4, para lo cual debemos calcular el valor de (C) mediante la ecuación 5, y el valor de (B) mediante la ecuación 6.

$$B = 2\pi(d_2 + d_1)$$

$$B = 2\pi(140 + 140)$$

$$B = 1759,3$$

$$C = \frac{B + \sqrt{B^2 - 32(d_2 - d_1)^2}}{16}$$

$$C = \frac{1759,3 + \sqrt{1759,3^2 - 32(140 - 140)^2}}{16}$$

$$C = 220 \text{ mm}$$

$$L = 2C + \frac{\pi}{2}(d_2 + d_1) + \frac{(d_2 - d_1)^2}{2C}$$

$$L = 2(220) + 1.57(140 + 140) + \frac{(140 - 140)^2}{2(220)}$$

$$L = 880 \text{ mm}$$

3.2.4.5 *Ángulo de contacto de la correa.* El ángulo de contacto de la correa se calcula en base a la ecuación 7, en donde el sistema, al tener una relación de transmisión de $i=1$, el ángulo de contacto es de 180° detallada a continuación.

$$\theta_1 = 180^\circ - 2 \sin^{-1} \left\{ \frac{d_2 - d_1}{2C} \right\}$$

$$\theta_1 = 180 - 2 \sin^{-1} \frac{(140-140)}{2 \times 220} = 180^\circ$$

3.2.4.6 *Determinación de la potencia nominal transmisible por correa.* Para determinar la potencia capaz de transmitir la correa se utiliza la ecuación 9 y 10, conociendo el valor del diámetro primitivo de la patea que es de 132mm, así como los valores de factores empíricos que proporciona la tabla 2-4.

$$K_i = \frac{1}{1 + 0,35 * \log \left[\frac{1 + 10 * \left\{ - \left(\frac{1}{0,35} \right) * \left(1 - \frac{1}{i} \right) \right\}}{2} \right]}$$

Sustituir el valor de $K_i=1$, en la ecuación 9 de la potencia transmisible por correa (N_i)

$$N_1 = d * r * \left[K_1 - \frac{K_2}{d} - K_3 * (d * r)^2 - K_4 * \log(d * r) \right] + k_2 * r * \left(1 - \frac{1}{K_i} \right)$$

$$N_1 = 132 * 3,6 * \left[0,041 - \frac{1,954}{132} - (1,32 \times 10^{-8}) * -0,0036 * \log(132 * 3,6) \right]$$

$$+ 1,954 * 3,6 * \left(1 - \frac{1}{1} \right)$$

$$N_1 = 7,11$$

3.2.4.7 *Determinación de la cantidad total necesaria de correas.* Para calcular la cantidad total necesaria de la correa se utiliza la ecuación 11, donde aplicamos los valores conocidos como:

Potencia corregida (Pc=) 0,75 kW,

Potencia transmisible por correa N1= 7,11 kW

Valores de mediante tablas de C2=1, (tabla 2-3), y C3=1 (tabla 2-5)

$$Z = \frac{Pc}{N1 * C2 * C3}$$

$$Z = \frac{0,75}{7,11 * 1,0 * 1,0}$$

$$Z = 0,1$$

De esta forma se deduce que, es suficiente la selección de una sola correa para el sistema de trasmisión.

3.2.4.8 *Calculo de la frecuencia fundamental de la banda.* Para calcular la frecuencia fundamental de la banda se utiliza la ecuación 12.

$$FFB = \frac{3,142 \times RPM \text{ POLEA } \times \text{DIAMETRO PRIMITIVO}}{\text{LONGITUD DE LA BANDA}}$$

$$FFB = \frac{3,142 \times 3000 \times 14cm}{99,72 cm}$$

$$FFB = 1322,32 rpm/60$$

$$FFB = 22 Hz$$

3.3 Cálculo de la tensión ejercida por la correa.

Para conocer la tensión que genera la correa de transmisión se realiza el análisis estático del sistema, sabiendo que el motor eléctrico genera una potencia de 1Hp y gira a una velocidad de 3000 RPM.

Aplicando la ecuación 16, que expone (Hamrock, y otros, 2000 pág. 835) se procede a realizar el cálculo de la fuerza F1 y F2, que ejerce la correa sobre las poleas al momento de transmitir la potencia. Para esto a su vez se conoce que el torque en el eje motor es de 1,98 Nm calculado mediante la ecuación 15 especificada en el capítulo 2.

$$T = F \frac{D}{2} = (F1 - F2) \frac{D}{2} \quad (16)$$

Dónde:

T: Torque del sistema

F1: lado tensado o fuerza de fricción impulsora, [N]

F2: lado flojo o fuerza de fricción impulsada, [N]

D: Diametro de la polea [mm]

$$F1 - F2 = \frac{2T}{D}$$

$$F1 - F2 = \frac{2 * (1,98Nm)}{0,14m}$$

$$F1 - F2 = 28,28N \quad (1)$$

Asimismo (Hamrock et al., 2000: p.835), menciona la ecuación 17 que:

$$\frac{F1}{F2} = e^{\left(\frac{\mu\Phi\pi}{180^\circ}\right)} \quad (17)$$

Dónde:

Φ = Angulo cubierto, grados = 180°

μ := Coeficiente de friccion = 0,35

$$\frac{F1}{F2} = e^{\left(\frac{0,35*180^\circ*\pi}{180^\circ}\right)}$$

$$F1 = 3F2 \quad (2)$$

Sustituir (2) en (1)

$$3F2 - F2 = 28,28N$$

$$2F2 = 28,28N$$

$$F2 = 14,14N = Fy$$

$$F1 = 42,42N = Fx$$

3.3.1 Cálculo de la fuerza ejercida por el alternador. Conociendo que la masa del alternador es de 3,3Kg, se aplica la ecuación 18:

Dónde:

m: masa del alternador

g: gravedad

$$W = m * g \quad (18)$$

$$W = 3,3\text{Kg} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$W = 31,78\text{N}$$

3.3.2 Diagrama de cuerpo libre del tensor. En el diagrama de cuerpo libre se consideran las fuerzas, de reaccion en la base del alternador, la fuerza de tension que se genera para mantener las poleas unidas mediante la correa, la fuerza generada por el peso mismo del alternador, y la fuerza que sera ejercida sobre el tensor del sistema.

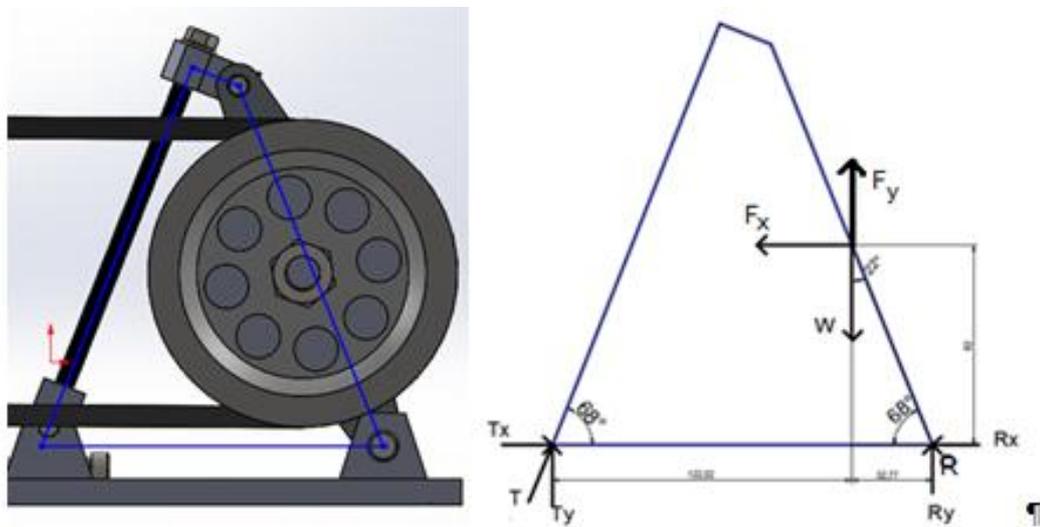


Figura 3-3. Diagrama de cuerpo libre

Dónde:

F: Fuerza de tensión generada por la correa

W: Fuerza ejercida por el peso del alternador

T: Fuerza que ejercida en el tensor de polea

R_x y R_y: Reaccionen producidas en la base del alternador “R”

F_x y F_y: Fuerzas de tensión generadas por la correa

Con el diagrama de cuerpo libre procedemos a realizar el análisis estático del sistema.

3.3.3 Sumatoria de fuerzas en el eje de las abscisas. Para la sumatoria de las fuerzas se toma como referencia el signo positivo al lado izquierdo.

$$\Sigma F_x = 0$$

$$R_x + F_x - T_x = 0$$

$$R_x - 42,42 - T_x = 0$$

$$R_x - T_x = 42,42N \quad (1)$$

3.3.4 Sumatoria de fuerzas en el eje ordenadas. Para la sumatoria de las fuerzas se toma considera la Tensión, Fuerza, y reacción ejercida en el eje “y”, tomando en consideración el signo positivo el sentido hacia arriba.

$$T_y - W + R_y + F_y = 0$$

$$T_y - 31,78N + R_y + 14,14N = 0$$

$$T_y + R_y = 31,78N - 14,14N$$

$$T_y + R_y = 17,64 \quad (2)$$

3.3.5 Sumatoria de momentos en el punto “R”. Para el cálculo de la sumatorias de momento en el punto de apoyo del alternador (R), se toma como referencia el sentido anti horario como positivo.

Dónde:

M_w : Momento ejercido por el peso del alternador

M_F : Momento ejercido por la fuerza de tensión de la correa

M_T : Momento ejercido en la base del tensor de la correa

$$\curvearrowright \Sigma M_R = 0$$

$$M_W + M_F - M_T =$$

$$W * 0,0327 + Fx * 0,082 - Fy * 0,0327 - Ty * 0,154 = 0$$

$$31,78N * 0,0327m + 42,42N * 0,082m - 14,14N * 0,0327 - Ty * 0,154m = 0$$

$$Ty * 0,154m = 4,06Nm$$

$$Ty = 26,39N \text{ (3)}$$

Reemplazando ecuación (3) en (2)

$$Ty + Ry = 17,64N$$

$$Ry = -26,39N + 17,64N$$

$$Ry = -8,75N$$

En (1) despejamos Rx, de la siguiente manera:

$$Rx - Tx = 42,42N$$

$$Rx - \frac{26,39}{\tan(68)} = 42,42N$$

$$Rx - \frac{26,39}{2,47} = 42,42N$$

$$Rx - 10,68 = 42,42N$$

$$Rx = 31,73N$$

$$R = \sqrt{Rx^2 + Ry^2}$$

$$R = 32,91N$$

$$Rx - Tx = 42,42N$$

$$Tx = 31,73N - 42,42N$$

$$Tx = 10,69N$$

$$T = \sqrt{Tx^2 + Ty^2}$$

$$T = \sqrt{10,69^2 + 26,39^2}$$

$$T = 28,47N$$

De esto podemos deducir que el tensor soportara una carga de 28,47 N, con lo cual procedemos a realizar el análisis del Factor de seguridad en el tensor de poleas.

3.4 Factor de Seguridad

Para realizar el cálculo del factor de seguridad procedemos a utilizar las siguientes ecuaciones según (BUDYNAS, y otros, 2008 págs. 17-30):

Esfuerzo Normal:

$$\sigma = \frac{P}{A}; \text{ (MPa)} \quad (19)$$

Deformación Total:

$$\rho_y = \frac{P*L}{A*E}; \text{ (GPa)} \quad (20)$$

Factor de Seguridad:

$$F.S = \frac{\sigma_y}{\sigma} \quad (21)$$

Dónde:

P: Fuerza Aplicada: 28,47 N

L: Longitud: 17cm

D: Diámetro: 8mm

Material: Acero AISI 403

E: Módulo de elasticidad: 190 GPa

σ_y : Límite Elástico: 206 MPa

Esfuerzo Normal: con los datos mencionados anteriormente remplazamos en la ecuación 19.

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

$$\sigma = \frac{28,47 \text{ N}}{\frac{\pi * d^2}{4}} = \frac{28,47 \text{ N}}{5,026 \times 10^{-7} \text{ m}^2}$$

$$\sigma = 56 \text{ MPa}$$

Deformación Total: remplazar la ecuación 20 para obtener la deformación total.

$$\rho_y = \frac{P * L}{A * E}$$

$$\rho_y = \frac{28,47 \text{ N} * 0,17 \text{ m}}{5,026 \times 10^{-7} * 190 \text{ GPa}} = 5,06 \times 10^{-6} \text{ m}$$

Factor de Seguridad: Mediante los resultados obtenidos de las ecuaciones 19 y 20 remplazamos en la ecuación 21, para así obtener el factor de seguridad.

$$F. S = \frac{\sigma_y}{\sigma}$$

$$F. S = \frac{206\text{MPa}}{56,6\text{MPa}} = 3,63$$

También se realiza el análisis utilizando el software SolidWorks, constatando que los resultados tanto calculados como simulados son equivalentes.

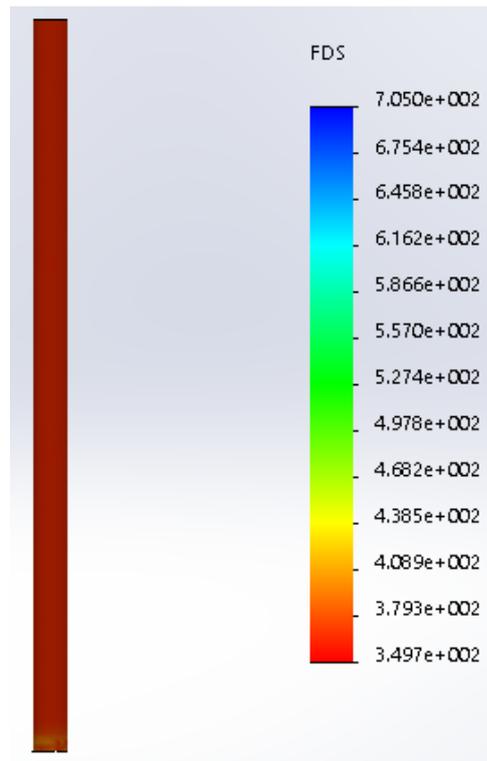


Figura 3-4. Simulación del factor de seguridad

Como se observa en la figura 3-4, la aplicación de una fuerza de compresión de 28,47N en el tensor de poleas, mediante simulación de cargas, origina un factor de seguridad de 3,63, este valor es equivalente al encontrado analíticamente. Con este resultado se afirma que el tensor cumplirá su función de forma segura.

3.5 Montaje del módulo de pruebas.

Para el ensamblaje del módulo de pruebas se dispone del software SOLIDWORKS versión 2017, y se detalla a continuación.

3.5.1 Montaje de la base del módulo de pruebas. La base se constituye de varios elementos como son: la placa base, placa de desalineación, base del alternador, base del motor, base del tensor y bases para la desalienación detallada a continuación en la figura 3-5.

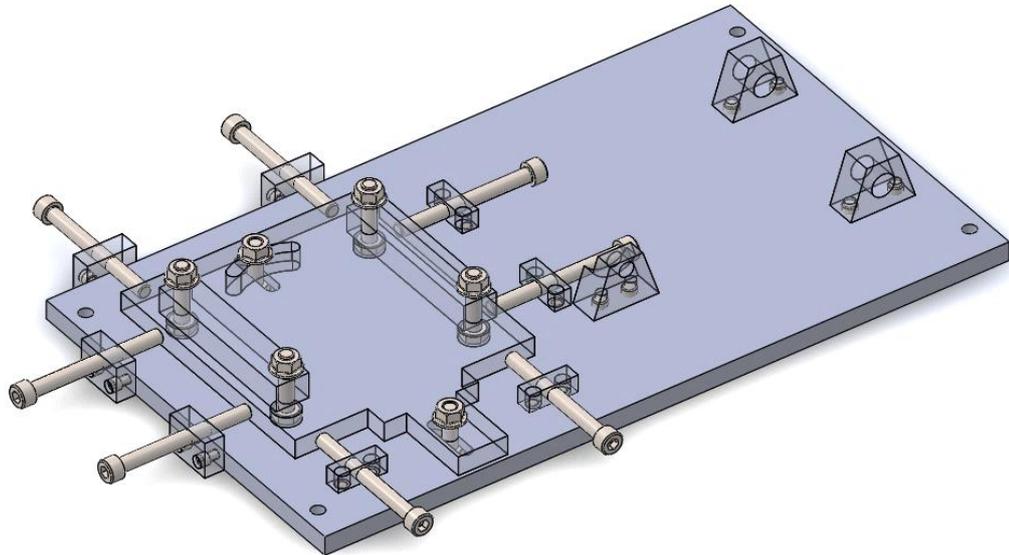


Figura 3-5. Placa base.

3.5.1.1 Características de los elementos principales de la base del módulo. En la tabla 3-5 especifica las características de los elementos principales de la base del módulo, que son necesarios para la simulación de modos de falla, como el material de constitución y sus dimensiones.

Tabla 3-5. Elementos que conforman la base del módulo

Elemento	Ancho mm	Largo mm	Espesor mm	Material
Placa base	250	400	10	AISI 1020
Placa de desalineación	170	200	10	AISI 1020
Base para perno de desalineación	30	20	10	AISI 1020
Base del motor	10	50	10	AISI 1020
Base del alternador	20	30	10	AISI 1020
Base tensor de polea	20	25	10	AISI 1020

El material que se debe utilizar para la construcción del módulo es el AISI 1020 ya que sus propiedades mecánicas y su maquinabilidad variable, hace que el material sea idóneo para la elaboración del módulo, sus propiedades son las son la siguiente:

- Este es un acero con alta maquinabilidad
- El acero AISI 1020 posea alta resistencia a la tracción
- Se puede soldar fácilmente

En el ANEXO K se presenta un mayor detalle de las propiedades del acero AISI 1020

3.5.2 Montaje de los elementos del módulo de pruebas

3.5.2.1 *Montaje del motor eléctrico.* El motor eléctrico jaula de ardilla seleccionado de 1HP, está sujeta con cuatro pernos hexagonales a la placa base de desalineación, así también la polea de acero de 140mm de diámetro como se detalla en la figura 3-6.

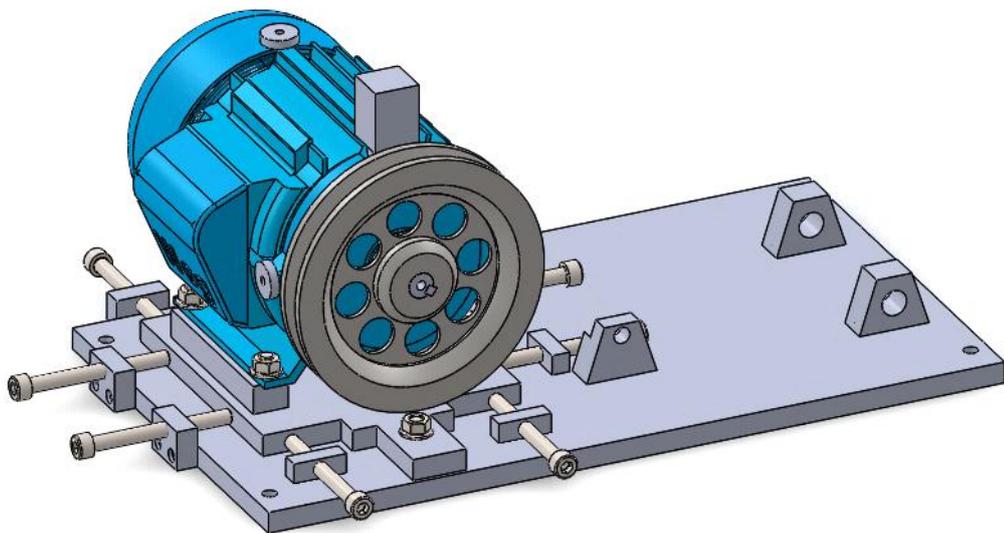


Figura 3-6. Montaje del motor jaula de ardilla

3.5.2.2 *Montaje del alternador.* El alternador como se visualiza en la Figura 3-7 está sujeta con un perno hexagonal que permite el movimiento angular al alternador; así también esta acoplada una polea de 140 mm de diámetro. Cabe mencionar que esta polea es de la misma dimensión de la polea acoplada en el motor por ser una relación 1=1.

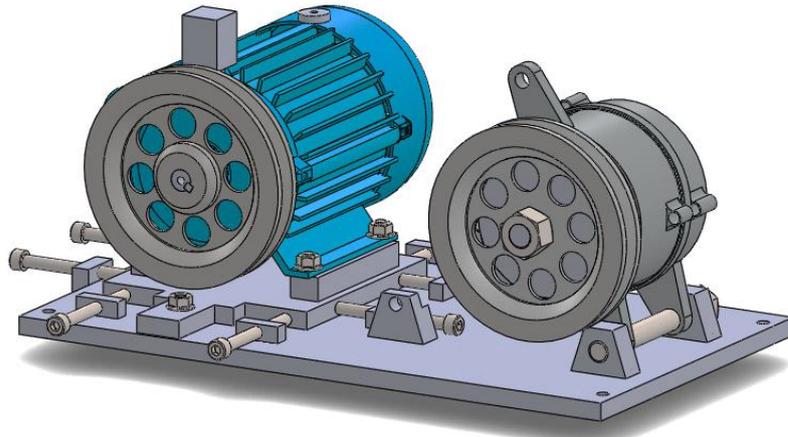


Figura 3-7. Montaje del alternador

3.5.2.3 *Montaje de la Correa trapezoidal.* Para el montaje de la correa trapezoidal el perno hexagonal que sujeta al alternador debe estar flojo, para que así el alternador tenga un libre movimiento angular como se ve en la figura 3-8.

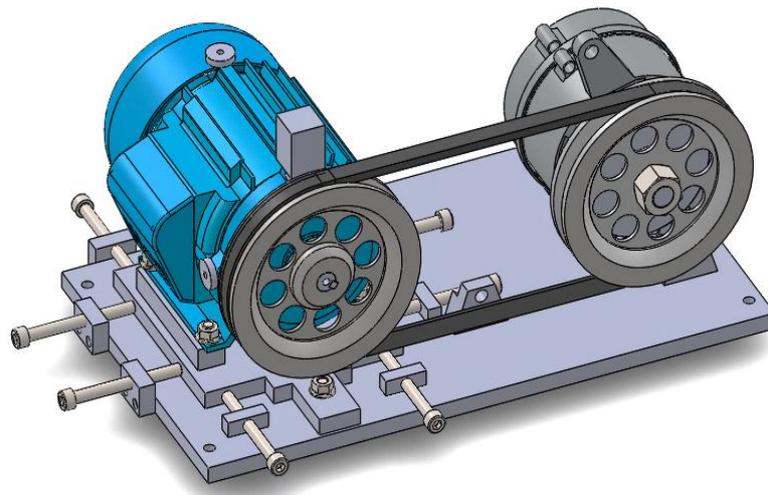


Figura 3-8. Montaje de la correa trapezoidal

3.5.2.4 *Tensado de la correa trapezoidal.* En todo sistema de transmisión mediante correa se debe tener cuidado de no forzar el ingreso de la correa en la hendidura de la polea, por esta razón es necesario un sistema de tensión para así montar la banda con facilidad y posteriormente darle el tensado adecuado.

Este tensor cuenta con un perno de paso fino, que está sujeto a la placa base y al alternador mediante sus apoyos, permitiendo el movimiento del alternador para así poder tensar en forma óptima a la correa como se detalla en la figura 3-9.

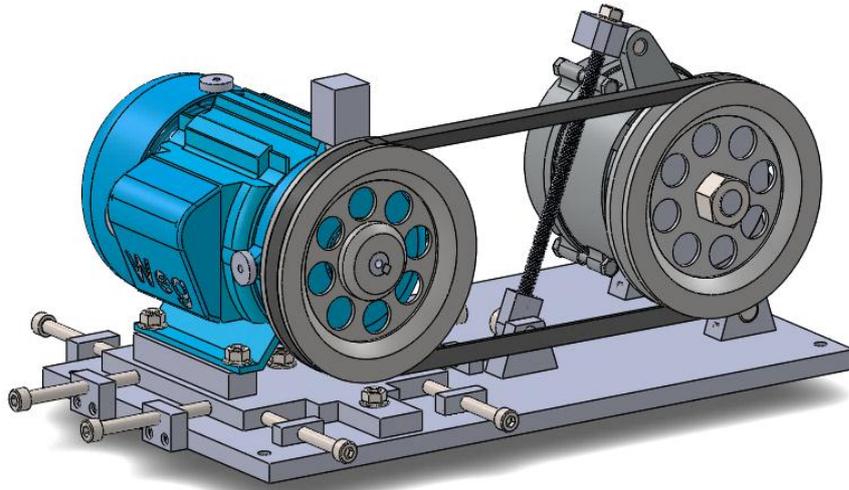


Figura 3-9. Tensado de la correa trapezoidal

CAPITULO IV

4. MATERIALES Y MÉTODOS

Para poder obtener los espectros de vibración, y por consiguiente diagnosticar los modos de falla, en este capítulo se especifica la metodología para la correcta utilización del módulo de pruebas y de los equipos necesarios para la toma de datos como son: Vibracheck, Analizador de la calidad de Energía, Cámara Termográfica, Foto tacómetro, Relojes comparadores, y alineador laser FAG.

4.1 Modos de falla a diagnosticar

Desalineación paralela

Desalineación angular horizontal

Desalineación angula vertical

4.2 Método para inducir desalineación paralela

Para provocar la desalineación paralela se construyó dos placas, estas placas van montadas una sobre otra, la primera placa (Placa Base), contiene a todo el sistema en si permitiendo el desplazamiento de la segunda placa (Placa de desalineación), la cual contiene al motor.

La segunda placa se desplaza de forma paralela juntamente con la polea motriz en relación a la polea conducida en un rango de 6 mm. Cabe mencionar que las medidas de desalineación serán controladas visualmente con la ayuda de relojes comparadores, para realizar mediciones de alta precisión.

En la figura 4-1 se visualiza la placa de desalineación, y los componentes necesarios para la generación del movimiento paralelo, para mayor entendimiento se etiquetan con P1, P2, P3 P4, D1, y D2, cada componente para más adelante detallar el funcionamiento de cada uno.

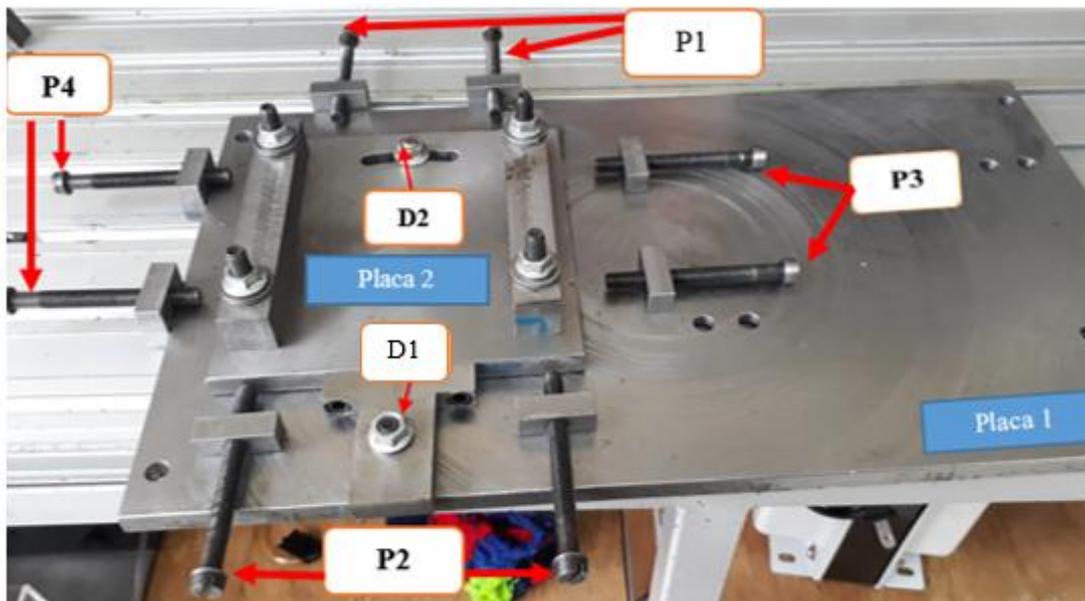


Figura 4-1. Placa de desalineación paralela

- Placa 1: Contiene a todo el sistema.
- Placa 2: Realiza el desplazamiento paralelo juntamente con el motor y la polea motriz, en relación a la polea conducida en un rango de (0-6) mm.
- D1 y D2: Son los pernos que realizan la sujeción de la placa de desalineación a la placa base, y permiten el juego o movimiento paralelo de las dos placas.
- P1 y P2: Son pernos tipo Allen que generan de forma controlada, el desplazamiento paralelo de la placa de desalineación, donde los pernos P1 provocan un avance de 1mm por cada vuelta completa que se le dé al perno.
- Los pernos P2 restringen el movimiento de la placa de desalineación, controlando el avance de esta, en un rango de (0-6) mm.
- P3 y P4: Son los pernos que evitan un movimiento angular, durante el avance de la placa de desalineación, generándose un desplazamiento netamente paralelo.

4.3 Método para inducir desalineamiento Angular Horizontal

Para la desalineación angular, en primera instancia se debe conocer los grados de desalineación a provocar, por tal razón se procede a calcular el ángulo de desplazamiento utilizando las relaciones trigonométricas.

Para ello se recurre a la figura 4-2.

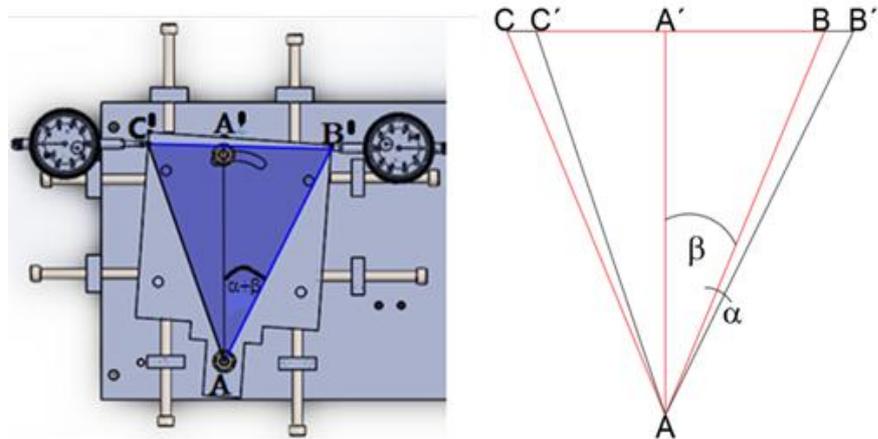


Figura 4-2. Ángulo de desplazamiento de desalineación angular horizontal

Dónde:

A: Perno fijo

A': Perno de recorrido del ranurado de la placa de desalineación

$\overline{AB'}$: 191mm

$\overline{A'B'}$: 84,92mm

β : 23,14°

α = ángulo de desalineación

Para calcular el ángulo de desalineación provocado (α), utilizaremos la función:

$$\text{Sen } (\alpha + \beta) = \frac{Co}{H}$$

$$\text{Sen } (\alpha + \beta) = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB'}}$$

$$\text{Sen } (\alpha + \beta) = \frac{84,92mm}{191mm}$$

$$\alpha + \beta = 26,4^\circ$$

$$\alpha = (26,4 - 23,14)^\circ$$

$$\alpha = 3,26^\circ$$

De esta forma se obtiene el ángulo de desalineación angular paralela provocado, esto al ejercer un desplazamiento de 6 mm, visualizados en los relojes comparadores.

En la siguiente tabla se muestran los valores de desalineación producidos.

Tabla 4-1. Dimensiones de desalineamiento Angular

Medición Tomada	Ángulo Producido en la placa de desalineación	Desplazamiento marcado en el reloj comparador
1	0,54°	1mm
2	1,08°	2mm
3	1,62°	3mm
4	2,17°	4mm
5	2,71°	5mm
6	3,26°	6mm

Una vez que se conoce, los grados de desalineación a provocar, se especifica cómo se realiza el desalineamiento, con los puntos de referencia presentes en la figura 4-3, donde:

- D1: Es el perno que sujeta a la placa base, la placa de desalineación y permite su movimiento angular.
- D2: Es el perno que sujeta la placa de desalineación a la placa base, y genera el movimiento angular, al restringir su movimiento a través de la ranura previamente mecanizada en la placa de desalineación. Este movimiento se da en los ángulos anteriormente mostrados en la Tabla 11.
- P1 y P2: Estos pernos son los encargados de generar el desplazamiento angular que se desea, al generar el avance de P1, con la ayuda de los relojes comparadores se medirá el desplazamiento de (1 a 6) mm, generando así los grados de desalineación según la tabla 11, mientras P2 restringe este movimiento para que sea de forma controlada.

- P3, P4, P5, P6: Estos pernos limitan el movimiento angular de la placa de desalineación manteniendo así constante los grados de desplazamiento a los cuales se ha sometido la placa, para asegurar mediciones de gran precisión.

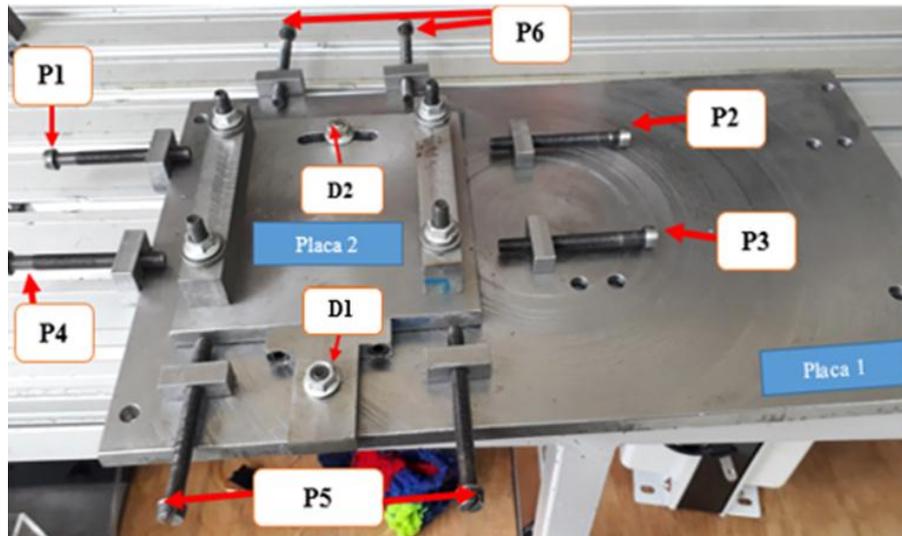


Figura 4-3. Placa de desalineación angular

4.4 Método para inducir el fallo de desalineación Angular Vertical

Para provocar la desalineación angular vertical, es necesario conocer el ángulo de desplazamiento generado, entre la placa de desalineación y las bases del motor eléctrico, para esto se utiliza la figura 4-4, y funciones trigonométricas.

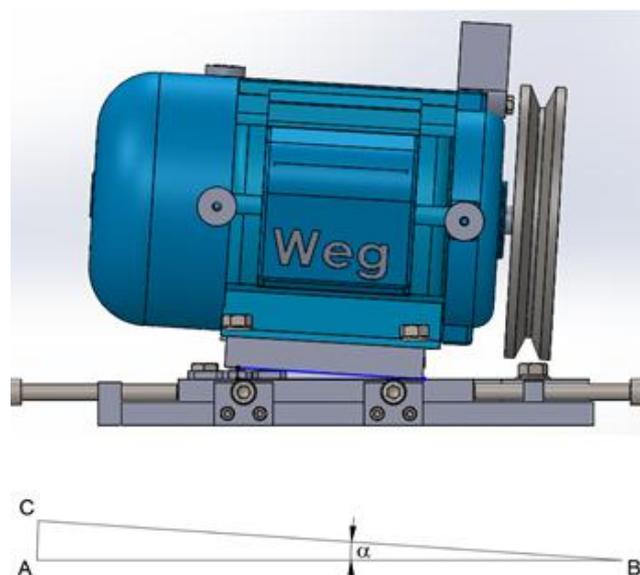


Figura 4-4. Ángulo de desplazamiento de desalineación angular vertical

Dónde:

B: Punto de contacto entre la placa de desalineación y la base del motor.

A: Punto de contacto entre la placa de desalineación y la base del motor sin efectuar desalineación.

C: Posición final de la base del motor al efectuar la desalineación

α : Angulo máximo de desalineación provocado mediante Shims.

$$\overline{BA} : 94,19 \text{ mm}$$

$$\overline{BC} : 94,19 \text{ mm}$$

$$\overline{AC} : 5,92$$

Para este cálculo utilizaremos la función:

$$\text{Sen } \alpha = \frac{Co}{H}$$

$$\text{Sen } \alpha = \frac{\overline{AC}}{\overline{BC}}$$

$$\text{Sen } \alpha = \frac{5,92mm}{94,19mm}$$

$$\alpha = 3,6^\circ$$

De esta forma se obtuvo el valor del ángulo de desalineación angular vertical, provocado mediante la colocación de Shims en la placa de desalineación.

En la tabla 4-2, se muestran los valores de desalineación provocados, así como la medida de los Shims utilizados para realizar esta desalienación.

Tabla 4-2. Medias para desalineación angular vertical.

Medición Tomada	Angulo de desalineación (grados)	Medida de Shims (mm)
1	0,44°	0,51
2	0,99°	1,16
3	2,09°	2,43
4	2,73°	3,17
5	3,16°	3,67
6	3,6°	4,18

Mediante la tabla 4-2, se procede a realizar la desalineación con los siguientes pasos:

- Se afloja los pernos de la parte delantera y posterior del motor (Figura 4-5).
- Se ubica los Shims en la parte posterior, entre los soportes del motor y la placa de desalineación, según la medida a realizar.
- Después de ubicar los Shims, se debe ajustar los pernos posteriores y delanteros para realizar las respectivas mediciones.

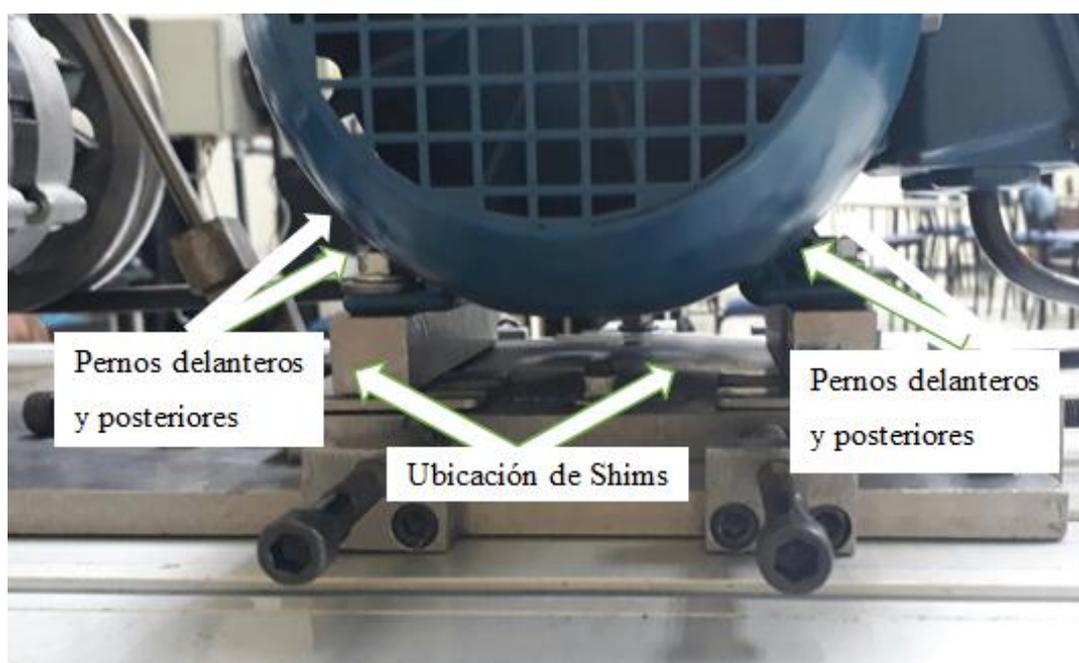


Figura 4-5. Desalineación Angular vertical

4.5 Equipos por utilizar para la toma de datos

Conociendo los métodos para provocar los modos de falla en sistemas de transmisión de potencia con polea, se debe conocer los equipos a utilizar para las distintas mediciones como son:

4.5.1 Equipo para Alineación laser de poleas. El alineador laser FAG SMARTY2 (figura 4-6) es un instrumento que emite una línea láser, en donde las poleas se encuentran correctamente alineadas si esta línea se proyecta sobre los centros de referencia. “El haz de láser emitido por el aparato está ajustado paralelo a las referencias magnéticas”. (Intriago Nacevilla , y otros, 2011 pág. 21).



Figura 4-6. Alineador Laser FAG SMARTY2

4.5.2 Equipo para el diagnóstico de vibraciones. El equipo Vibracheck ABG 200, mostrado en la figura 4-7, permite la recolección de datos para un posterior análisis de vibraciones, estos datos variaran dependiendo de la desalineación generada en el módulo, proporcionando un estadístico de progreso del modo de falla.



Figura 4-7. Equipo Vibracheck ABG 200

4.5.3 Equipo digital foto tacómetro. Este equipo, mostrado en la figura 4-8, proporciona medidas de la velocidad de rotación en revoluciones por minuto (RPM), a la cual gira la polea motriz y polea conducida.



Figura 4-8. Foto tacómetro DT-2234C

4.5.4 Equipo Analizador de energía. Este equipo mostrado en la figura 4-9, realiza mediciones de potencia, voltaje, corriente, y diversas variables que permiten analizar la calidad de energía.



Figura 4-9. Analizador de energía (Fluke 435-II)

4.5.5 Pinzas amperimétricas Las pinzas amperimétricas i5s mostradas en la figura 4-10, amplían el campo de utilización del analizador de calidad de energía Fluke 435 II, proporcionándole precisión en medidas de baja corriente, estas pinzas tienen una salida de 400 mV por cada 1A, de nivel de entrada de corriente alterna, para mayor detalle se especifican sus características en el ANEXO L.



Figura 4-10. Pinzas amperimétricas

4.5.6 *Equipo para análisis de termografía.* Para realizar el análisis Termográfico en el módulo de pruebas, se utiliza una cámara Termográfica FLIR E5 observada en la figura 4-11,



Figura 4-11. Cámara FLIR E5

Cabe mencionar que dicho equipo se utilizó, para conocer el incremento de temperatura del sistema de transmisión, al generarse las diferentes desalineaciones.

4.5.7 *Relojes Comparadores.* Los relojes comparadores de la figura 4-12, son de gran importancia, debido a que ofrecen control y precisión al momento de realizar las distintas desalineaciones.

Estos relojes “transforman el movimiento lineal de la barra deslizante de contacto, en movimiento circular que describe la aguja del reloj en donde una vuelta completa equivale a un milímetro de recorrido lineal, así también consta de un soporte magnético que permite colocarlo en la posición requerida” (Melillo, 2012 pág. 1).



Figura 4-12. Reloj Comparador

4.5.8 Puntos de medición para la adquisición de datos. Referenciando la norma ISO 10816 -1995, se muestra la figura 4-13, en donde se detalla los puntos de ubicación correcta, de los sensores de vibración y los terminales para conectar el analizador de la calidad de energía.

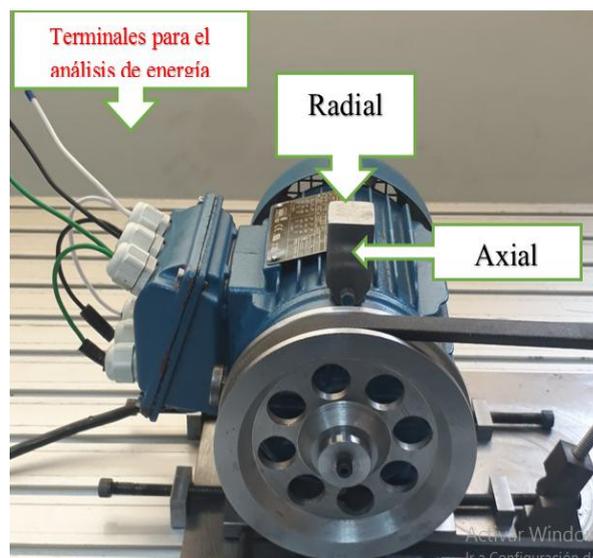


Figura 4-13. Puntos de medición vibracional y Analizador de energía

4.6 Cálculos de potencia del motor eléctrico trifásico.

Para el análisis de la calidad de la energía se utilizó el equipo Fluke 435-II, el cual proporciona los datos necesarios para calcular la carga adecuada del motor, para ello se utilizó un alternando de 12 V y 35 A, que permite regular la carga excitando el bobinado del rotor con un voltaje de 12 V CC.

Uno de los requerimientos, para que el módulo simulador de fallas brinde las características deseadas para las que fue construido, es que el motor trabaje alrededor del 80 % de su carga nominal, para determinar esa carga, realizamos los siguientes cálculos:

4.6.1 Cálculo de la potencia del motor eléctrico. Para realizar el cálculo de la potencia del motor eléctrico, se toma los datos de la placa detallada anteriormente en el capítulo 3,

Se utiliza la ecuación 15, según (NTE INEN 2498, 2009).

$$P_{e \text{ nominal}} = \sqrt{3} * v * I * \text{Cos } \varphi$$

$$P_{e \text{ nominal}} = \sqrt{3} * (220) * (3) * (0.85)$$

$$P_{e \text{ nominal}} = 971,68 \text{ W}$$

La potencia de 971,68 W es calculada con datos nominales, cuando el motor trabaja al 100% de su capacidad.

Cabe mencionar que el módulo de desalineación de poleas presentó un problema de resonancia especificada en el inciso 5.1.1.2, por lo cual se decidió trabajar a una frecuencia de 48 Hz equivalente a 2880 rpm.

Para conocer la potencia a 48 Hz, se calcula el torque del sistema a 60Hz, utilizando la ecuación 15 especificada en el capítulo 2

$$Tn = \frac{60 P}{2 * \pi * n}$$

$$Tn = \frac{60 (750w)}{2 * \pi * (3600)}$$

$$Tn = 1,98 Nm$$

Conociendo que el torque del sistema es de 1,98 N.m. se procede a calcular la potencia mecánica a una frecuencia de 48 Hz, equivalente a 2880 rpm.

4.6.1.1 *Potencia mecánica a frecuencia de 48 Hz* Para el cálculo de la potencia mecánica a una frecuencia de 48 Hz se utiliza la ecuación 15 detallada en el capítulo 2.

$$P_{mecánica} = \frac{T * rpm}{9550}$$

$$P_{mecánica} = \frac{1,98 * 2880}{9550}$$

$$P_{mecánica} = 0,597 kW$$

$$P_{mecánica} = 597 W$$

Con el cálculo de la potencia mecánica a 48 Hz realizamos la siguiente relación:

$$0,750 kW \text{ mecánica} \text{-----} 0,597 kW \text{ mecánica}$$

$$0,971 kW \text{ eléctrica} \text{-----} X$$

$$X = \frac{0,97168 kwe * 0,597K w m}{0,750Kw m}$$

$$X = 0,773Kw$$

El valor de 773 W equivale a la potencia eléctrica al 100% de carga.

4.6.1.2 *Cálculo de la potencia eléctrica al 80 % de su carga a 48 Hz.* Con los datos obtenidos anteriormente de la potencia eléctrica al 100%, se realizó la siguiente relación para conocer la potencia del motor al 80 % de su capacidad.

$$773 \text{ w} \text{ ----- } 100\%$$

$$X \text{ ----- } 80\%$$

$$X = \frac{773w \cdot 80}{100}$$

$$X = 618,4w$$

El valor de **618,4 W** equivale al 80 % de carga nominal, cuando el motor trabaja a 48 Hz, esta potencia se utilizó como punto de partida para las respectivas mediciones.

4.7 Procedimiento para simular la desalineación de poleas.

Para demostrar cómo simular la desalineación de poleas, y la utilización de los equipos se detalla el procedimiento a seguir en cada una de las distintas desalineaciones.

4.7.1 Procedimiento para simular la desalineación paralela.

A continuación, se detalla el procedimiento para realizar de manera correcta la simulación de desalineación paralela en el módulo de pruebas.

Tabla 4-3. Procedimiento para simular la desalineación paralela

PROCEDIMIENTO	ESPECIFICACIÓN
Utilizar equipo de protección personal.	

Tabla 4-4. (Continua) Procedimiento para simular la desalineación paralela

<p>Montar el módulo de desalineación en la mesa de aluminio ranurado.</p>	
<p>Tensar adecuadamente la banda.</p>	
<p>Alinear correctamente las poleas, utilizando el alineador láser, verificar que el emisor este sujeto a la polea conductora de tal forma que la luz láser atraviese los receptores ubicados previamente en la polea conductora.</p>	
<p>Conectar el Analizador de la calidad de la energía, ubicando las pinzas amperimétricas y de voltaje en su respectiva línea con los colores correspondientes.</p>	

Tabla 4-5. (Continua) Procedimiento para simular la desalineación paralela

<p>Comunicar el analizador de vibraciones con la computadora, mediante el Software MAINTraq Predictive, ubicando los acelerómetros en posición axial</p>	
<p>Armar las articulaciones de los relojes palpadores acorde a las necesidades de la desalineación paralela.</p>	
<p>Ubicar los relojes palpadores en la parte posterior de la placa de desalineación, controlando así su desplazamiento paralelo.</p>	
<p>Ubicados los relojes palpadores se los debe encerrar, empezando así la desalineación.</p>	

Tabla 4-6. (Continua) Procedimiento para simular la desalineación paralela

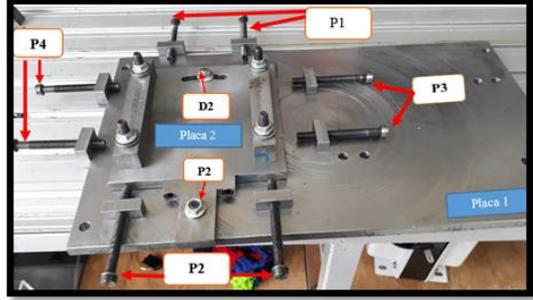
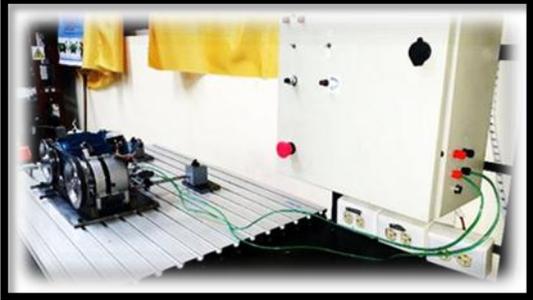
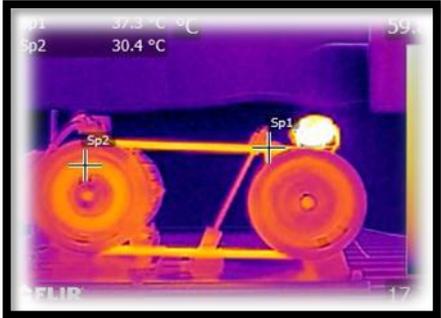
<p>Aplicar la metodología detallada en el inciso 4.2.</p>	 <p>Diagrama de montaje de un alternador. Se muestran dos placas, Placa 1 y Placa 2, con varios puntos de ajuste etiquetados como P1, P2, P3, P4 y D2. Las flechas rojas indican la dirección de ajuste de los tornillos.</p>
<p>Alimentar el rotor del alternador con 12 voltios de corriente continua.</p>	 <p>Fotografía de un alternador conectado a un sistema de alimentación. Se ven cables verdes conectados a un panel de control o fuente de alimentación.</p>
<p>Regular la frecuencia de trabajo mediante el variador de frecuencia, en este caso a una frecuencia de 48 Hz.</p>	 <p>Fotografía de un variador de frecuencia Siemens SINAMICS V20. El display digital muestra el valor 5.50.</p>
<p>Encender el motor tomando siempre las debidas precauciones.</p>	 <p>Fotografía de un panel de control con botones y luces. Se ven botones rojos y verdes, y una luz verde encendida.</p>

Tabla 4-7. (Continua) Procedimiento para simular la desalineación paralela

<p>Accionar el bombillo alógeno conectado al alternador, para generar consumo de energía, y así el motor trabaje al 80% de su capacidad nominal.</p>	
<p>Tomar datos de potencia con la ayuda del analizador de la calidad de la energía.</p>	
<p>Configurar y cargar la ruta en el analizador de vibraciones, para posteriormente descargar los datos de en el software MAINtraq Predictive.</p>	
<p>Tomar medidas de las revoluciones por minuto en la polea conductora y conducida con el fototacómetro.</p>	

Tabla 4-8. (Continua) Procedimiento para simular la desalineación paralela

<p>Realizar mediciones de temperatura mediante la cámara Termográfica.</p>	
<p>Apagar el motor y volver a realizar el procedimiento con una desalineación mayor.</p>	

El procedimiento detallado en la tabla 4-3, se realizó en un rango de (1-6) mm que corresponden a la desalineación paralela.

Cabe mencionar que se realizaron 6 mediciones en esta desalineación, ya que los resultados obtenidos son aceptables, además de existir una alta probabilidad de daño prematura de la banda debido a la alta temperatura generada a los 6 mm de desalineación.

4.7.2 Procedimiento para simular la desalineación angular horizontal

En la tabla 4-4, se detalla la manera correcta para realizar la simulación de desalineación angular horizontal en el módulo de pruebas.

Tabla 4-9. Procedimiento para simular la desalineación Angular horizontal

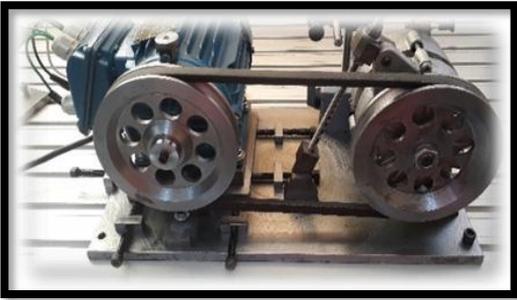
PROCEDIMIENTO	ESPECIFICACIÓN
Utilizar equipo de protección personal.	
Montar el módulo de desalineación en la mesa de aluminio ranurado.	
Tensar adecuadamente la banda.	
Alinear correctamente las poleas con la ayuda del alineador laser, el emisor debe estar sujeto en la polea conducida y los receptores en la polea conductora.	

Tabla 4-10. (Continua) Procedimiento para simular la desalineación Angular horizontal

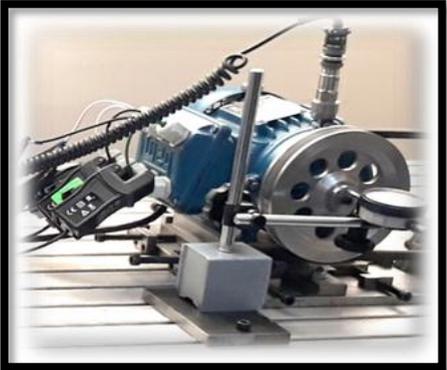
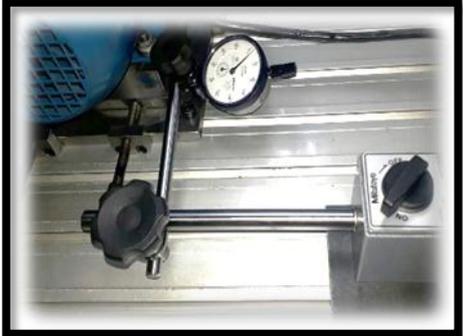
<p>Conectar el Analizador de la calidad de la energía, ubicando las pinzas amperimétricas y de voltaje en cada línea con los colores correspondientes</p>	
<p>Comunicar el analizador de vibraciones con la computadora mediante el Software MAINtraq Predictive, posteriormente ubicar los acelerómetros en posición axial</p>	
<p>Armar las articulaciones de los relojes palpadores acorde a las necesidades de la desalineación angular horizontal.</p>	
<p>Ubicar los relojes palpadores en la parte posterior de la placa de desalineación, para que al momento de provocar el desalineamiento con los pernos P1 y P2 los relojes midan el desplazamiento angular,</p>	

Tabla 4-11. (Continua) Procedimiento para simular la desalineación Angular horizontal

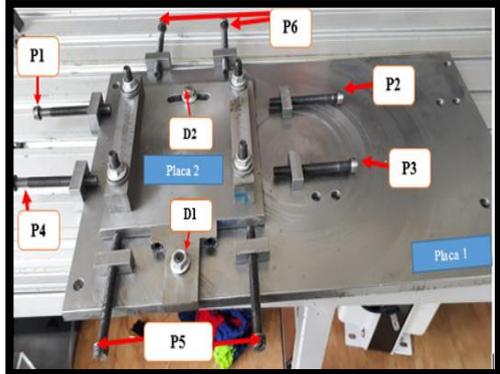
<p>Después de ubicar los relojes palpadores, se los debe encerrar para empezar la desalineación.</p>	
<p>Realizar la desalineación, en base a la metodología detallada en el inciso 4.3.</p>	
<p>Alimentar el rotor del alternador con 12 voltios de corriente continua.</p>	
<p>Regular la frecuencia de trabajo mediante el variador de frecuencia, en este caso a 48 Hz.</p>	

Tabla 4-12. (Continua) Procedimiento para simular la desalineación Angular horizontal

<p>Encender el motor tomando siempre la debida precaución</p>	
<p>Accionar el bombillo alógeno conectado al alternador para generar el consumo de energía, y así el motor trabaje al 80% de su capacidad nominal.</p>	
<p>Tomar datos de potencia con el analizador de la calidad de la energía.</p>	
<p>Cargar la ruta antes configurada, en el analizador de vibraciones, para posteriormente descargar los datos de vibraciones en el software MAINTraq Predictive y generar los espectros de desalineación.</p>	

Tabla 4-13. (Continua) Procedimiento para simular la desalineación Angular horizontal

<p>Tomar medidas de las revoluciones en cada polea con ayuda del fototacómetro.</p>	
<p>Tomar lecturas de temperatura mediante la cámara Termográfica</p>	
<p>Apagar el motor para volver a realizar el procedimiento con una desalineación mayor.</p>	

El procedimiento detallado en la tabla 4-4, se debe realizar para cada una de las medidas de desalineación correspondiente a este modo de falla.

4.7.3 Procedimiento para simular la desalineación angular vertical.

Para realizar la desalineación angular vertical se aplica el procedimiento detallado en la tabla 4.5.

Tabla 4-14. Procedimiento para simular la desalineación angular vertical

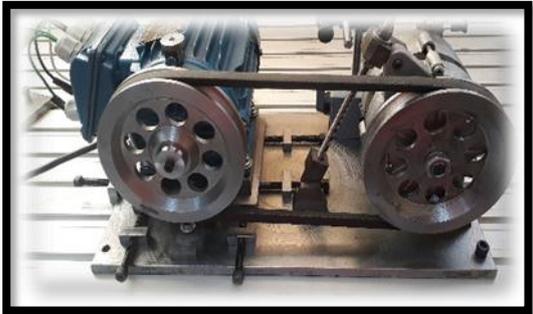
PROCEDIMIENTO	ESPECIFICACIÓN
Utilizar equipo de protección personal.	
Montar el módulo de desalineación en la mesa de aluminio ranurado.	
Tensar adecuadamente la banda	
Alinear correctamente las poleas con la ayuda del alineador laser, el emisor debe estar sujeto a la polea conducida y el receptor a la polea conductora.	

Tabla 4-15. (Continua) Procedimiento para simular la desalineación angular vertical

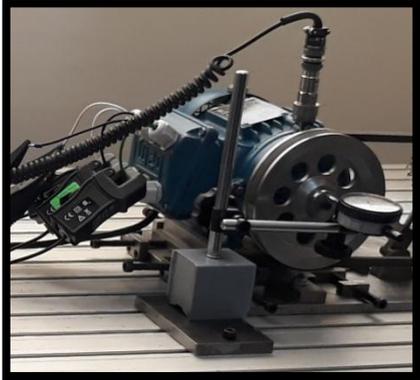
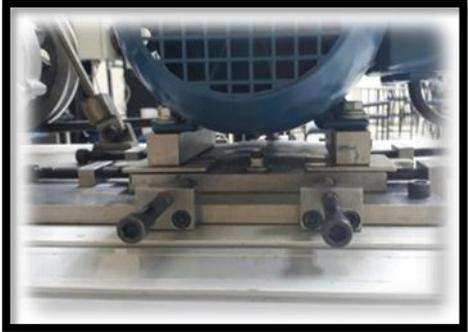
<p>Conectamos el Analizador de la calidad de la energía, ubicando las pinzas amperimétricas y las de voltaje en cada línea con los colores correspondientes.</p>	
<p>Comunicar el analizador de vibraciones con la computadora mediante el software MAINTraq Predictive, posteriormente ubicar los acelerómetros en posición axial.</p>	
<p>Aflojar los pernos que sujetan el motor, tanto delantero como posterior.</p>	
<p>Ubicar los Shims entre la placa de desalineación, y la placa base, de acuerdo al grado de desalineación a realizar para luego ajustar los pernos que anteriormente se aflojaron</p>	

Tabla 4-16. (Continua) Procedimiento para simular la desalineación angular vertical

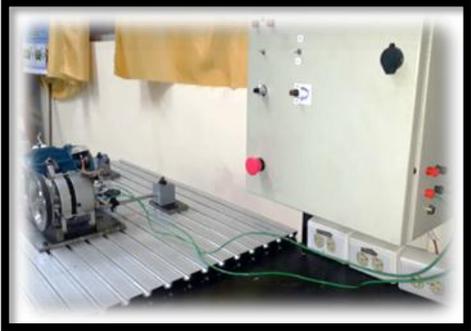
<p>Alimentar el rotor del alternador con 12 voltios de corriente continua.</p>	 A photograph showing a laboratory setup. On the left, there is a blue motor or generator. To its right, a power supply unit is connected to a terminal block. Wires connect the power supply to the rotor of an alternator, which is partially visible on the right side of the frame.
<p>Regular la frecuencia de trabajo mediante el variador de frecuencia, en este caso a 48 Hz.</p>	 A photograph of a Siemens SIMATIC 520 frequency converter. The device is a grey, rectangular unit with a digital display showing '5.50'. It has several control buttons (red, green, blue) and a terminal block at the bottom.
<p>Encender el motor tomando siempre la debida precaución</p>	 A photograph of a control panel for a motor. It features a green indicator light that is illuminated, a red emergency stop button, a black stop button, and a digital display showing '23.3'. There are also several other smaller buttons and switches.
<p>Accionar el bombillo alógeno conectado al alternador, para generar consumo de energía, y así el motor trabaje al 80% de su capacidad nominal.</p>	 A photograph showing a halogen lamp connected to the alternator. The lamp is mounted on a metal frame and is illuminated, casting a bright light. The setup is part of a laboratory experiment to load the motor.

Tabla 4-17. (Continua) Procedimiento para simular la desalineación angular vertical

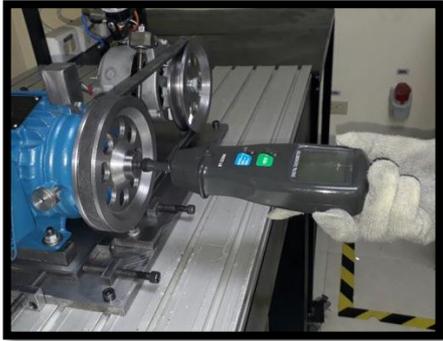
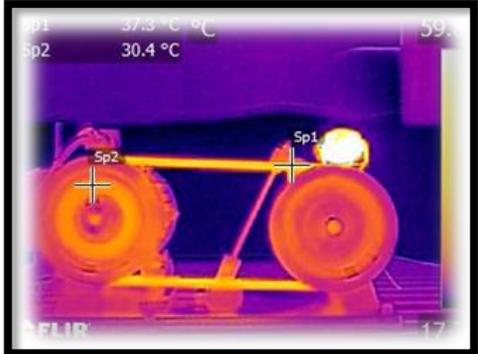
<p>Tomar datos de la potencia con el analizador de la calidad de la energía.</p>	
<p>Cargar la ruta antes configurada en el analizador de vibraciones, para posteriormente descargar los datos de vibraciones y generar los espectros mediante el Software MAINTraQ Predictive dependiendo del grado de desalineación.</p>	
<p>Tomar medidas de revoluciones por minuto en cada con la ayuda del fototacómetro.</p>	
<p>Tomar lecturas de temperatura mediante la cámara Termográfica.</p>	

Tabla 4-18. (Continua) Procedimiento para simular la desalineación angular vertical

<p>Apagar el motor para volver a realizar el procedimiento, con una desalineación mayor.</p>	
--	--

El procedimiento de tabla 4-5, detalla la manera de provocar la desalineación angular vertical, esta se obtiene mediante Shims, como se especifica en la tabla 12.

CAPITULO V

5. MEDICIÓN, ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.

En este capítulo se detalla las mediciones correspondientes a vibraciones y eficiencia energética, estas mediciones se tomaron desde un estado inicial del módulo para posteriormente realizar las distintas desalineaciones, tanto angular horizontal, paralela, y angular vertical.

Se realizó los respectivos análisis espectrales, con las poleas correcta e incorrectamente alineadas, así también se tabuló e interpretó mediante graficas de tendencia los datos obtenidos de Desalineación vs Potencia, para determinar si aumenta o disminuye el consumo energético provocado por los diferentes niveles de desalineación.



Figura 5-1. Toma de datos con los respectivos equipos

5.1 Pruebas iniciales de funcionamiento

Las mediciones de las pruebas iniciales de funcionamiento se realizan con la ayuda de los equipos detallados anteriormente en el capítulo IV como son: el Analizador de vibraciones, Analizador de calidad de la energía, Alineador laser de poleas, esto para determinar en qué condiciones iniciales se encuentra el módulo, para posteriormente realizar el análisis de vibraciones en relación con la desalineación.

5.1.1 Mediciones iniciales de Vibraciones. Para iniciar la toma de datos de vibraciones, se consideró identificar la presencia de la frecuencia natural de banda (FNB), frecuencias naturales del módulo, Frecuencia fundamental de banda (FFB), como también la existencia de resonancia entre los componentes que integran el módulo.

5.1.1.1 *Medición y análisis de Frecuencia Natural de la Banda.* Para obtener la frecuencia natural de la banda, se realiza la excitación vibrante de la correa ya sea de forma radial o axial, esto depende de la posición del acelerómetro, para ello se utiliza el equipo analizador de vibraciones y el programa MAINtraq Viewer.

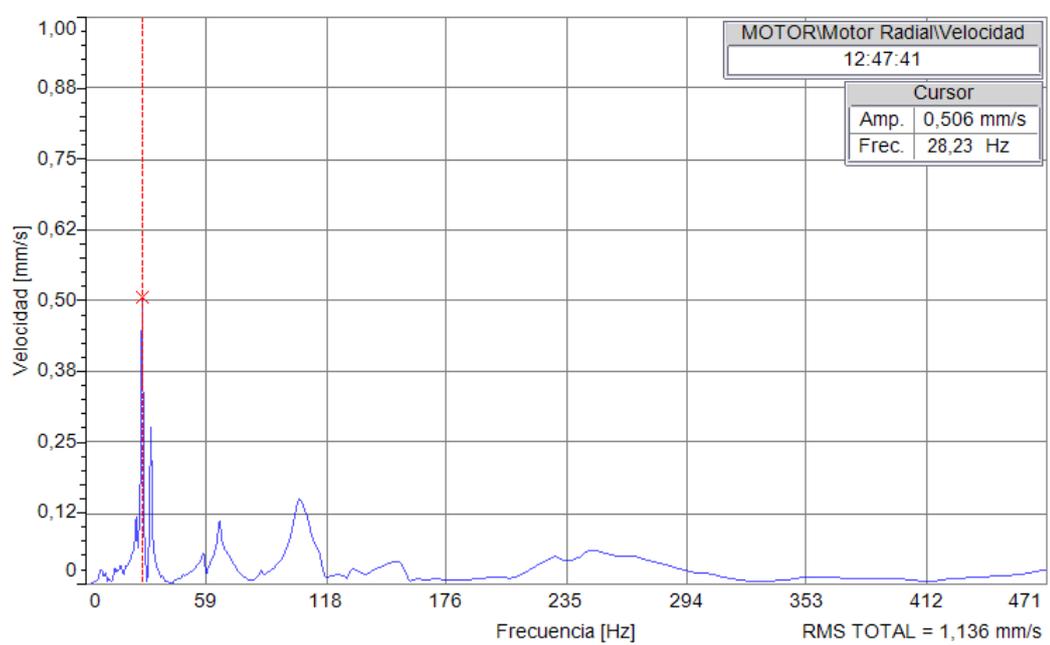


Gráfico 5-1. Frecuencia natural de la banda

En el gráfico 5-1 se observa la presencia de un espectro predominante con una frecuencia equivalente a 28,23Hz con una amplitud de 0,506 mm/s.

5.1.1.2 *Medición y análisis de Frecuencias Naturales del módulo.* Una vez que se dispone del módulo de simulación de modos de falla en sistemas de transmisión mediante polea, se procede a realizar las mediciones concernientes al análisis de vibraciones, tomando como punto de partida el estudio del espectro característico de frecuencia natural del módulo gráfico 5-2.

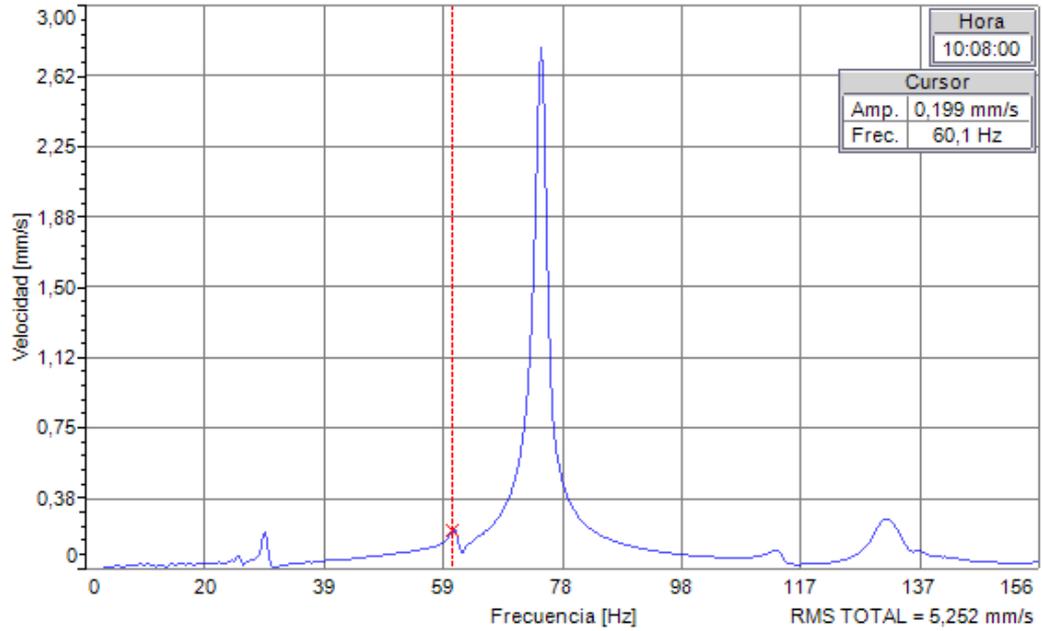


Gráfico 5-2. Espectro de frecuencia natural del módulo.

Mediante el análisis del presente espectro se ha logrado identificar la presencia de un armónico natural con una frecuencia de 60 Hz, por lo que el módulo deberá funcionar con una frecuencia de rotación inferior, para evitar problemas por resonancia.

5.1.2 Pruebas de Alineación correcta de las poleas. Como primeras pruebas de estado inicial del módulo se procede a verificar que las poleas se encuentren correctamente alineadas, por esto previamente se las alineó con la ayuda del alineador laser de poleas como se puede ver en la figura 5-2

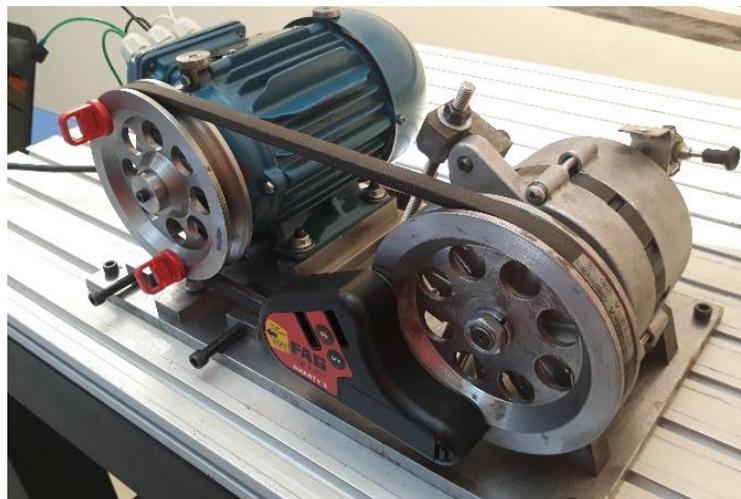


Figura 5-2. Pruebas de Alineación Correcta de poleas

5.1.3 Mediciones iniciales de la calidad de la energía.

5.1.3.1 *Medición inicial de la calidad de energía.* Con la ayuda del analizador de la calidad de la energía se realizó las mediciones correspondientes, encontrando así los datos expuestos en la tabla 5-1.

Tabla 5-1. Medidas iniciales de la calidad de la energía

W	650,2
VA	872,1
VAR	498
PF	0,75

En la medición realizada se observó en el analizador de la calidad de energía, una potencia de 650,2 W, constatando así que el motor trabaja alrededor del 80% de su capacidad nominal.

5.1.4 Medición y análisis de Frecuencias en condiciones ideales. Para realizar las mediciones de vibraciones en primera instancia se obtiene un espectro característico, que indica valores en el espectro de velocidad como son: armónicos de frecuencia fundamental de la banda (FFB), frecuencia natural de la banda (FNB), frecuencias fundamentales 1X y 2X en condiciones ideales.

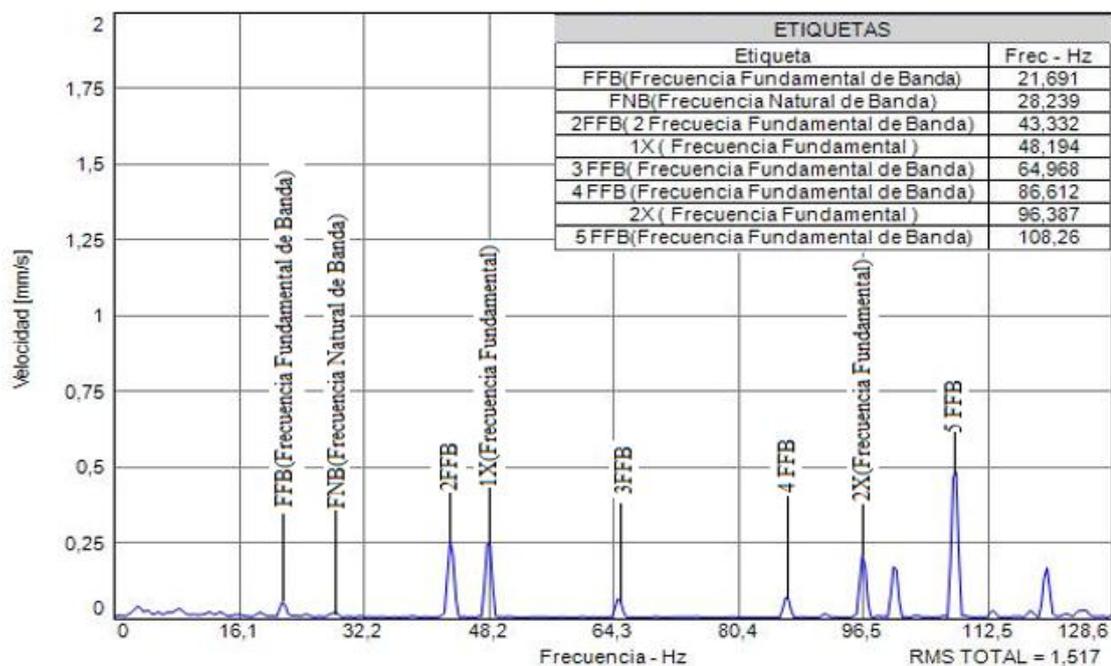


Gráfico 5-3. Espectro característico

En el gráfico 5-3, se identifica claramente los armónicos que están en el espectro de velocidad, con un RMS total de 1,517 mm/s.

A continuación, en la tabla 5-2 se detalla los valores de frecuencias identificadas del espectro característico

Tabla 5-2. Frecuencias del espectro característicos

Armónicos	Hz
FFB (Frecuencia fundamental de la banda)	21,691
FNB (Frecuencia natural de la banda)	28,239
2FFB (Frecuencia fundamental de la banda)	43,332
1X (Frecuencia fundamental)	48,194
3FFB (Frecuencia fundamental de la banda)	64,968
4FFB (Frecuencia fundamental de la banda)	86,612
2X (Frecuencia fundamental)	96,387
5FFB (Frecuencia fundamental de la banda)	108,26

Estos armónicos son muy importantes como punto de partida para comparar los cambios que se produce debido a las desalineaciones.

5.2 Medición de los distintos modos de falla concernientes a las desalineaciones.

Para tomar las mediciones correspondientes a las desalineaciones tanto Paralela, Angular Horizontal y Angular Vertical, debemos trabajar a una frecuencia de 48 Hz tomando como referencia el espectro característico.

5.2.1 Mediciones mediante la desalineación paralela. Para las mediciones de este modo de falla se parte desde el espectro característico, para así proceder a realizar seis medidas de desalineación a intervalos de 1 mm.

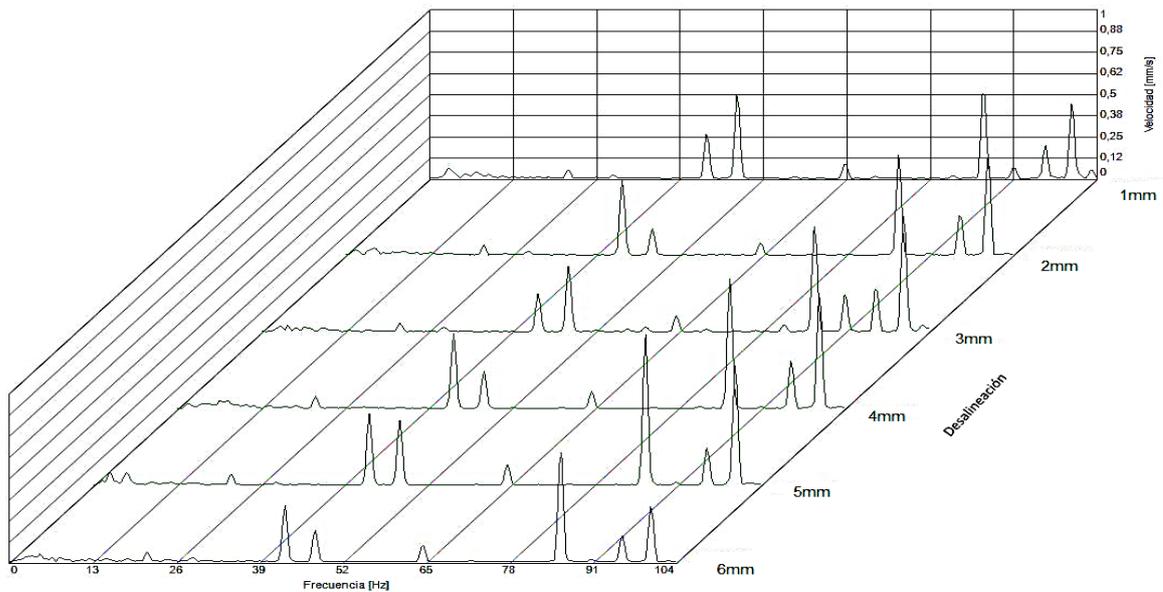


Gráfico 5-4. Espectros de desalineación paralela

Mediante el software MAINTRAQ PREDICTIVE se obtiene la gráfica 5-4 en forma de cascada, misma que evidencia el incremento de valor RMS, conforme aumenta el grado de desalineación.

5.2.1.1 *Tabulación de resultados de la desalineación paralela.* Con los datos del analizador de vibraciones, se procede a tabular estos resultados para evidenciar la variación de frecuencias naturales, frecuencia fundamental de la correa, frecuencia del motor 1X, frecuencia del alternador 2X, como también valores de RMS total, tabla 5-3.

Tabla 5-3. Datos de vibración obtenidos

Desalineación	Frecuencia natural de la correa		Frecuencia fundamental de la correa		Frecuencia del motor		Frecuencia del alternador		RMS Total
	FFB.N		FFB		1X		2X		
Milímetros	Hz	mm/s	Hz	mm/s	Hz	mm/s	Hz	mm/s	mm/s
1	28,7	0,02	21,7	0,053	48,04	0,493	96,09	0,146	1,658
2	28,7	0,02	21,7	0,06	48,04	0,158	96,09	0,235	1,791
3	28,7	0,03	21,7	0,051	48,04	0,388	96,09	0,254	1,837
4	28,7	0,004	21,7	0,071	48,04	0,221	96,09	0,28	1,888
5	28,7	0,02	21,7	0,066	48,04	0,384	96,09	0,218	2,005
6	28,7	0,02	21,7	0,058	48,04	0,185	96,09	0,156	2,127

Mediante la tabulación de los datos obtenidos de la desalineación paralela se observa que existe un incremento del RMS Total así como de la FFB, FNB, 1X, 2X, a medida que aumenta la desalineación, comprobando así que el módulo realiza la función para la que fue construido.

5.2.1.2 *Regresión lineal de desalineación paralela.* Para realizar la regresión lineal de los datos detallados en la tabla 5-4, se utiliza el método de ajuste por mínimos cuadrados

Tabla 5-4. Regresión lineal de la desalineación paralela

Medición	Desalineación(X)	RMS(Y)	X*Y	X ²	Y ²
1	1	1,658	1,66	1,00	2,75
2	2	1,791	3,58	4,00	3,21
3	3	1,837	5,51	9,00	3,37
4	4	1,888	7,55	16,00	3,56
5	5	2,005	10,03	25,00	4,02
6	6	2,127	12,76	36,00	4,52
Suma	21	11,306	41,090	91,000	21,440
Promedio	3,5	1,884	6,848	15,167	3,573

El ajuste por mínimos cuadrado permite linealizar los datos de la tabla 5-4 en base a la ecuación de la recta, la cual se detalla a continuación según (Chapra, 2007 págs. 961-963)

$$Y = a + bx \quad (22)$$

Dónde según (Chapra, 2007 págs. 961-963):

y= Variable independiente

a = Intersección con el eje Y

x = Variable dependiente

b = Pendiente

Conociendo la ecuación de la recta a continuación se indica las ecuaciones para el cálculo de la (b) pendiente, (a) intersección con el eje y, (R^2) valor de correlación (Chapra, 2007 págs. 961-963):

$$b = \frac{n\sum x*y - \sum x*\sum y}{n\sum x^2 - (\sum x)^2} \quad (23)$$

Dónde:

b= pendiente

n= número de medidas

Σ = sumatoria de tabla de regresión lineal según la desalineación

$$a = \frac{\sum y - b\sum x}{n} \quad (24)$$

Dónde (Chapra, 2007 págs. 961-963):

a= intersección con el eje Y

n= número de medidas

Σ = sumatoria de tabla de regresión lineal según la desalineación

Remplazamos en las ecuaciones 23 y 24 con los datos de la tabla 4-5

$$b = \frac{6(41,090) - (21 * 11,306)}{6(91) - (21)^2}$$

$$b = 0,086$$

$$a = \frac{11,306 - 0,086(21)}{6}$$

$$a = 1,583$$

Ya calculado la pendiente (b) e intersección con el eje “y” (a), reemplazamos en la ecuación 22, para así obtener la ecuación que se ajusta a la grafica

$$Y = 1,583 + 0,086x$$

Con la ecuación que se ajusta a la gráfica, se calcula el valor de correlación (R^2) mediante la siguiente ecuación:

$$R^2 = 1 - \frac{Se^2}{S^2y} \quad (25)$$

Donde:

Se= Error Estimado

S^2y =Varianza de la variable separable

Para saber el valor del coeficiente de correlacion (R^2) se debe calcular el Error estimado,y la varianza de la variable separable (Chapra, 2007 págs. 961-977), la cual se detalla a continuacion:

$$Se = \sqrt{\frac{\Sigma y^2 - a\Sigma y - b\Sigma x*y}{n-2}} \quad (26)$$

Donde mediante (Chapra, 2007 págs. 961-977):

Se= Error estimado

n=numer de medidas

Σ = sumatoria de tabla de regresión lineal según la desalineación

$$S^2y = \frac{\Sigma y^2}{n} - \bar{y}^2 \quad (27)$$

Dónde (Chapra, 2007 págs. 961-977) indica que:

S^2y = la varianza de la variable separable

n = numer de medidas

\bar{y}^2 = valor de promedio de "Y" que se indican en la tabla de regresión lineal

Σ = sumatoria de tabla de regresión lineal según la desalineación

Una vez conociendo las ecuaciones del Error estimado (ecuacion 26), y la varianza de la variable separable (ecuación 27), se remplazo con los valores que se especifican en la tabla 5-4.

$$Se = \sqrt{\frac{21,440 - 1,583(11,306) - 0,086(41,090)}{6 - 2}}$$

$$Se = 0,047$$

$$S^2y = \frac{21,440}{6} - 1,884^2$$

$$S^2y = 0,0238$$

Los valores obtenidos anteriormente se remplazan en la ecuación 25 para así obtener el valor de coeficiente de correlación

$$R^2 = 1 - \frac{Se^2}{S^2y}$$

$$R^2 = 1 - \frac{(0,047)^2}{0,0238}$$

$$= 0,907$$

Los valores calculados anteriormente demuestran que el grado de ajuste es apreciable, otorgando así una alta fiabilidad de los datos obtenidos, para mediante ellos poder realizar la gráfica de tendencia.

5.2.1.3 *Gráfica de tendencia de la desalineación paralela vs rms total.* El gráfico 5-5 indica que existe un incremento del rms total a medida que aumenta la desalineación paralela.

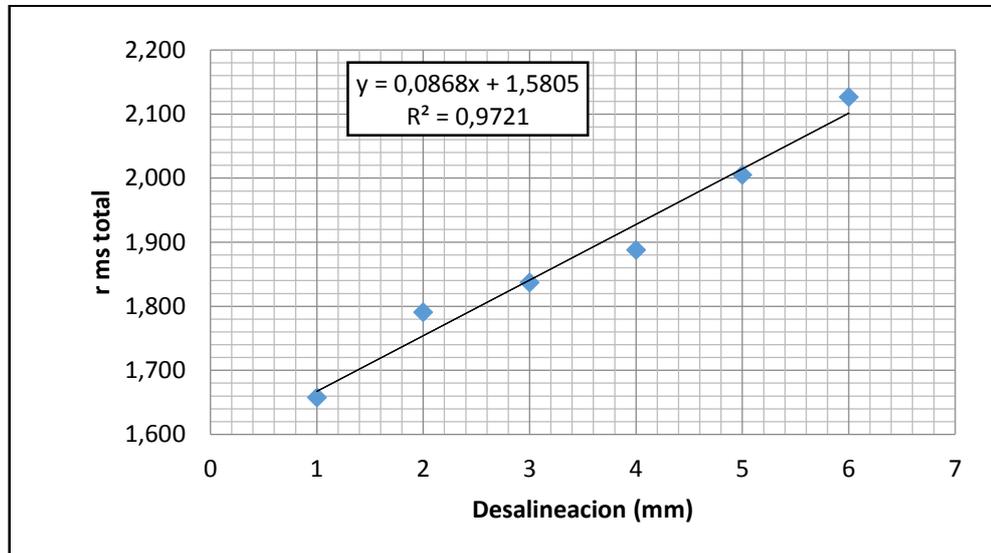


Gráfico 5-5. Tendencia de la desalineación paralela vs. Rms total

5.2.1.4 *Tabulación del consumo energético vs la desalineación paralela.* De igual manera se ha realizado el análisis de eficiencia energética en donde se ha constatado que existe una relación directamente proporcional entre la desalineación y el aumento de consumo energético Tabla 5-5.

Tabla 5-5. Tabulación del consumo energético vs la desalineación paralela

Desalineación (mm)	Potencia (W)
1	672,2
2	674,8
3	678,2
4	681,4
5	682
6	690

5.2.1.5 *Gráfica de tendencia de la desalineación paralela vs Potencia.* El gráfico 5-6 indica que a medida que incrementa la desalineación paralela, la potencia del motor también aumenta, evidenciado así que el consumo energético aumenta debido a la desalineación.

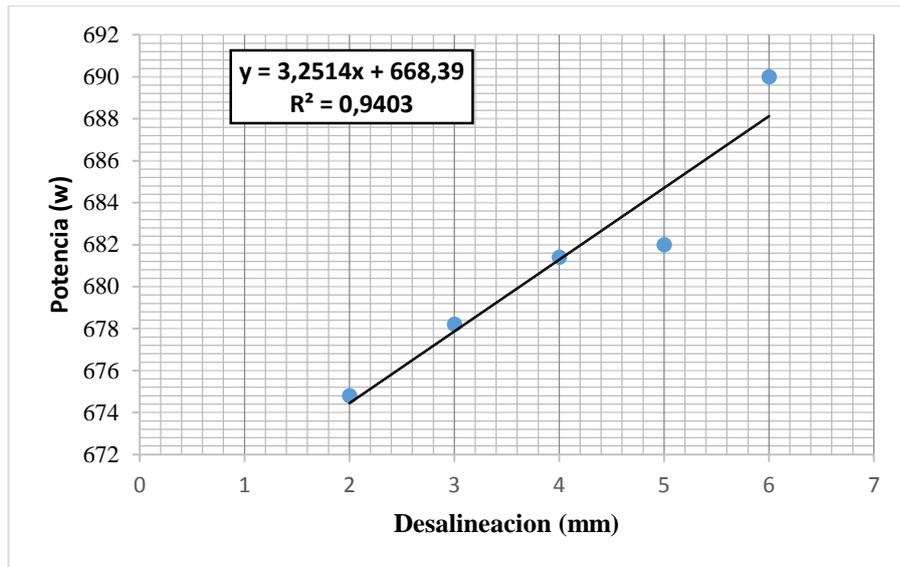


Gráfico 5-6. Tendencia de la desalineación vs potencia

5.2.2 Mediciones concernientes a la desalineación angular horizontal. Para las mediciones de este modo de falla, se parte del espectro característico procediendo a realizar seis medidas de desalineación especificadas en la tabla 4-1.

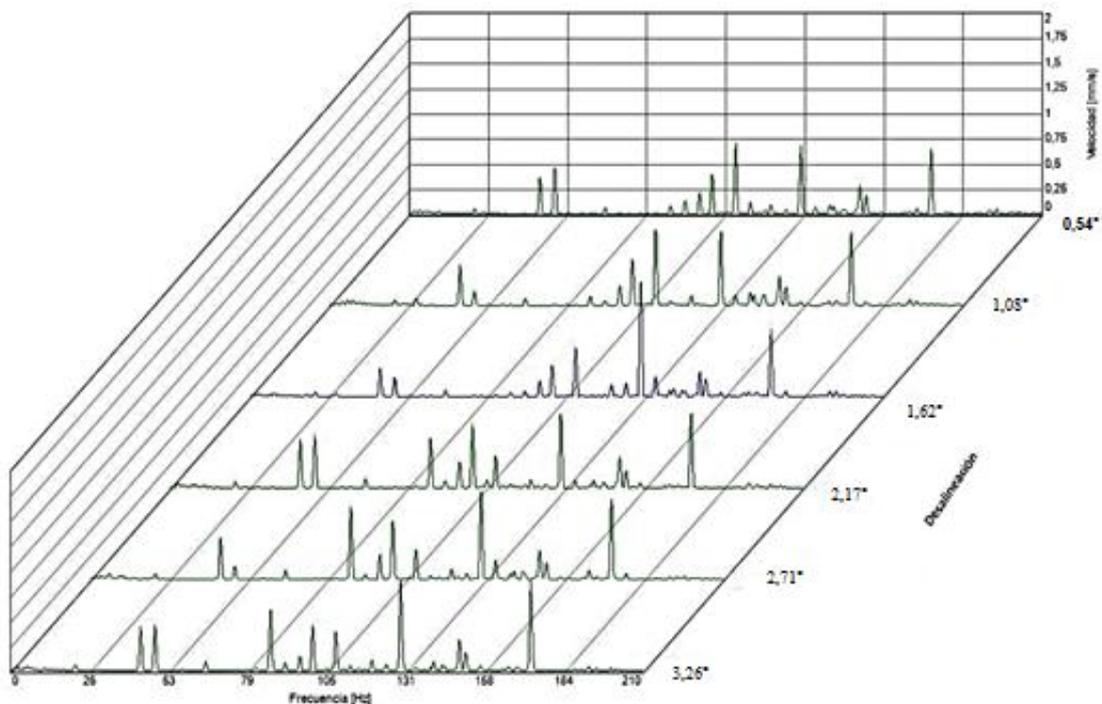


Gráfico 5-7. Mediciones de desalineación angular

Con la ayuda del software MAINTRAQ PREDICTIVE se obtiene el gráfico 5-7 de cascada, misma que evidencia el incremento del valor RMS, conforme aumenta el grado de desalineación.

5.2.2.1 *Tabulación de resultados de la desalineación angular Horizontal.* Los valores que se tabulan en la Tabla 5-6 son FFB, FNB, velocidad del motor (1X), velocidad del alternador (2X), y el RMS total que evidencia el incremento de las mismas conforme aumenta el grado de desalineación.

Tabla 5-6. Datos de vibración obtenidos

Desalineación	Frecuencia natural de la correa		Frecuencia fundamental de la correa		Frecuencia del motor		Frecuencia del alternador		RMS Total
	Grados sexagesimales	FFB.N	FFB	1X	2X				
Grados	Hz	mm/s	Hz	mm/s	Hz	mm/s	Hz	mm/s	mm/s
0,54°	28,9	0,013	21,7	0,053	48,06	0,449	96,12	0,126	1,608
1,08°	28,9	0,07	21,7	0,058	48,06	0,148	96,12	0,132	1,731
1,62°	28,9	0,024	21,7	0,051	48,06	0,19	96,12	0,115	1,796
2,17°	28,9	0,012	21,7	0,065	48,06	0,527	96,12	0,249	1,778
2,71°	28,9	0,005	21,7	0,058	48,06	0,135	96,12	0,204	1,839
3,26°	28,9	0,011	21,7	0,064	48,06	0,45	96,12	0,137	1,916

En la tabla 5-6 se visualiza que a medida que aumenta el grado de desalineación existe un incremento del RMS Total así como de FFB, FNB, 1X, 2X comprobando así que el módulo cumple con las condiciones especificadas por las cuales fue construido.

5.2.2.2 *Regresión lineal de la desalineación angular horizontal.* Para realizar la regresión lineal, se procede utilizando el método de mínimos cuadrados, con los datos obtenidos en la tabla 5-7.

Tabla 5-7. Regresión lineal de la desalineación angular horizontal

Medición	Desalineación(X)	RMS(Y)	X*Y	X ²	Y ²
1	0,54	1,61	0,87	0,29	2,59
2	1,08	1,73	1,87	1,17	3,00
3	1,62	1,80	2,91	2,62	3,23
4	2,17	1,78	3,86	4,71	3,16
5	2,71	1,84	4,98	7,34	3,38
6	3,26	1,92	6,25	10,63	3,67
Suma	11,38	10,67	20,74	26,76	19,02
Promedio	3,25	3,05	5,92	7,65	5,43

El ajuste por mínimos cuadrado linealiza los datos de la tabla 5-7 en base a la ecuación de la recta que se detalla en la ecuación 22

$$Y = a + bx$$

Dónde:

y = Variable independiente

a = intersección con el eje y

x = variable dependiente

b = pendiente

Conociendo la ecuación 22 de la recta a continuación se utiliza las ecuaciones 23, 24 y 25 antes detallada, para el cálculo de la (b) pendiente, (a) intersección con el eje Y, (R^2) valor de correlación respectivamente.

Pendiente:

$$b = \frac{n\sum x * y - \sum x * \sum y}{n\sum x^2 - (\sum x)^2} = \frac{6(20,74) - (11,38 * 10,67)}{6(26,76) - (11,38)^2}$$

$$b = 0,097$$

Intersección con el eje Y

$$a = \frac{\Sigma y - b\Sigma x}{n} = \frac{10,67 - 0,097(11,38)}{6}$$

$$a = 1,594$$

Después de calcular la pendiente (b) e intersección con el eje “y” (a), remplazamos en la ecuación 22, para así obtener la ecuación que ajusta a la grafica

$$Y = a + bx$$

$$Y = 1,594 + 0,097x$$

Con la ecuación que se ajusta a la gráfica, se calcula el valor de correlación (R^2) mediante la siguiente ecuación 25

$$R^2 = 1 - \frac{Se^2}{S^2y}$$

Donde:

Se= Error Estimado

S^2y =Varianza de la variable separable

Para saber el valor del coeficiente de correlacion (R^2) se debe calcular el Error estidmado (ecuacion 26) ,y la varianza de la variable separable (ecuacion 27).

Error estidmado

$$Se = \sqrt{\frac{\Sigma y^2 - a\Sigma y - b\Sigma x * y}{n - 2}} = \sqrt{\frac{19,02 - 1,59(10,67) - 0,097(20,74)}{6 - 2}}$$

$$Se = 0,103$$

Varianza de la variable separable

$$S^2y = \frac{\Sigma y^2}{n} - \bar{y}^2 = \frac{19,02}{6} - 1,77^2$$

$$S^2y = 0,0371$$

Con los valores obtenidos anteriormente se remplazan en la ecuación 25 para obtener el valor de coeficiente de correlación

$$R^2 = 1 - \frac{(0,103)^2}{0,037}$$

$$R^2 = 0,8$$

Los valores calculados anteriormente demuestran que el grado de ajuste es apreciable, otorgando así una alta fiabilidad de los datos obtenidos, para mediante ellos poder realizar la gráfica de tendencia, demostrada en el gráfico 5-8.

5.2.2.3 *Gráfica de tendencia de la desalineación angular horizontal vs rms total.* En el gráfico 5-8 se puede evidenciar la tendencia que tiene el RMS total a medida que se incrementa el grado de desalineación angular horizontal.

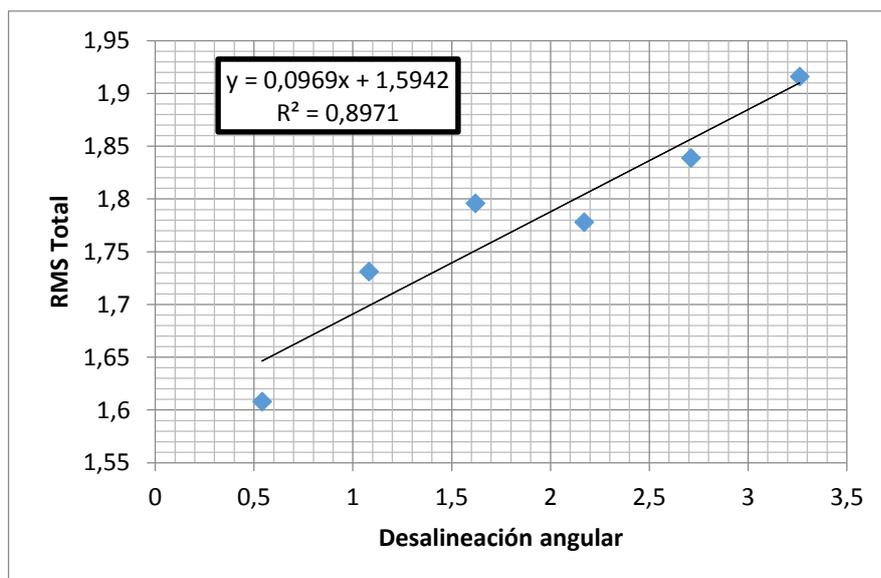


Gráfico 5-8. Tendencia de la desalineación angular vs. Rms total

5.2.2.4 *Tabulación del consumo energético vs la desalineación.* El análisis de eficiencia energética vs. la desalineación angular se detalla mediante datos numéricos, en donde se constata que existe una relación directamente proporcional entre la desalineación y el aumento de consumo energético como se observa en la tabla 5-8

Tabla 5-8. Datos de potencia en relación con la desalineación

Desalineación angular	Potencia (w)
0,54°	665,7
1,08°	671,7
1,62°	676,7
2,17°	679,1
2,71°	678,3
3,26°	682,6

5.2.2.5 *Grafica de tendencia de la DAH vs Potencia.* Como se observa el gráfico 5-9, existe una tendencia considerable de potencia a medida que incrementa el grado de desalineación angular horizontal, comprobando que a mayor desalineación mayor consumo energético.

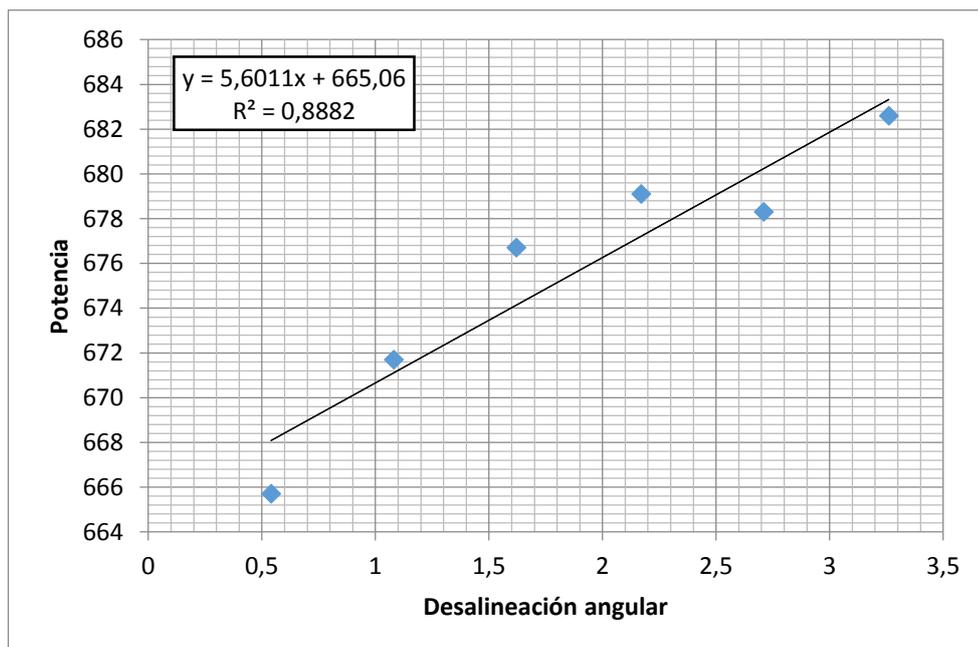


Gráfico 5-9. Tendencia de la desalineación Angular vs. Potencia

5.2.3 Mediciones concernientes a la desalineación angular vertical. Para este modo de falla se realiza seis mediciones como lo indica la tabla 4-2, para ello se parte del espectro característico detallado en la figura 5-12.

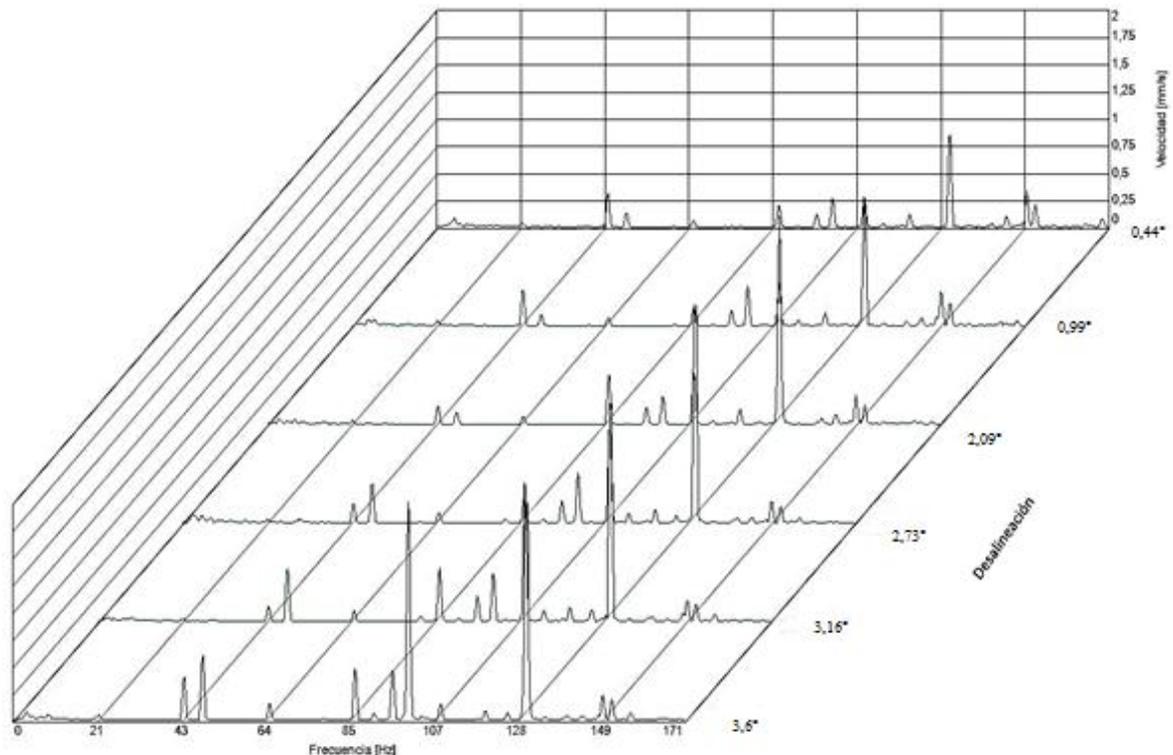


Gráfico 5-10. Medidas de desalineación angular vertical

Con la ayuda del software MAINTRAQ PREDICTIVE se obtienen las gráficas de los espectros a diferente desalineación en forma de cascada, que permite visualizar los cambios de los espectros de frecuencia.

El gráfico 5-10, evidencia el incremento de valor RMS, conforme aumenta el grado de desalineación angular vertical.

5.2.3.1 Tabulación de resultados de la desalineación angular vertical. Con los datos obtenidos del analizador de vibraciones MAINtraq Predictive, se procede a tabular los resultados para evidenciar con mayor claridad la variación existente del valor RMS total, el valor de Frecuencia natural de la correa, la frecuencia fundamental de la correa, frecuencia del alternador, y frecuencia del motor,

Estos valores se los especifica en la tabla 5.9

Tabla 5-9. Datos de vibración de la desalineación Angular vertical obtenidos

Desalineación	Frecuencia natural de la correa		Frecuencia fundamental de la correa		Frecuencia del motor		Frecuencia del alternador		RMS Total
	FFB.N		FFB		1X		2X		
Grados sexagesimales	Hz	mm/s	Hz	mm/s	Hz	mm/s	Hz	mm/s	mm/s
0,44°	28,4	0,005	21,6	0,046	48,21	0,12	96,42	0,122	1,88
0,99°	28,4	0,006	21,6	0,05	48,21	0,75	96,42	0,146	1,84
2,09°	28,4	0,002	21,6	0,04	48,21	0,092	96,42	0,16	2,207
2,73°	28,4	0,015	21,6	0,038	48,21	0,357	96,42	0,204	3,225
3,16°	28,4	0,012	21,6	0,032	48,21	0,483	96,42	0,237	3,284
3,6°	28,4	0,008	21,6	0,048	48,21	0,599	96,42	0,456	3,994

En la tabla 5-9 se observa que a medida que aumenta el grado de desalineación angular vertical, existe un incremento del RMS Total y de FFB, FNB, 1X, 2X, comprobando así que el módulo cumple con las condiciones especificadas por las cuales fue construido.

5.2.3.2 *Regresión lineal de la desalineación angular vertical.* Para realizar la regresión lineal de la tabla 5-10, se procede utilizando el método de mínimos cuadrados,

Tabla 5-10. Regresión lineal de la desalineación angular vertical

Medición	Desalineación(X)	RMS(Y)	X*Y	X ²	Y ²
1	0,44	1,84	0,81	0,19	3,39
2	0,99	1,88	1,86	0,98	3,53
3	2,09	2,21	4,62	4,37	4,88
4	2,73	3,23	8,82	7,45	10,43
5	3,16	3,28	10,36	9,99	10,76
6	3,60	3,99	14,36	12,96	15,92
Suma	13,01	16,43	40,84	35,94	48,92
Promedio	2,17	2,74	6,81	5,99	8,15

El ajuste por mínimos cuadrado linealiza los datos de la tabla 5-10, en base a la ecuación de la recta que se detalla en la ecuación 22

$$Y = a + bx$$

Dónde:

y = Variable independiente

a = intersección con el eje y

x = variable dependiente

b = pendiente

Conociendo la ecuación 22 de la recta a continuación se utiliza las ecuaciones 23, 24 y 25 antes detallada, para el cálculo de la (b) pendiente, (a) intersección con el eje Y, (R^2) valor de correlación respectivamente

Pendiente:

$$b = \frac{n\Sigma x * y - \Sigma x * \Sigma y}{n\Sigma x^2 - (\Sigma x)^2} b = \frac{6(40,84) - (13,01 * 16,43)}{6(35,94) - (13,01)^2}$$

$$b = 0,67$$

Intersección con el eje Y

$$a = \frac{\Sigma y - b\Sigma x}{n} a = \frac{16,43 - 0,67(13,01)}{6}$$

$$a = 1,28$$

Mediante los resultados obtenidos mediante las ecuaciones 23 y 24 remplazamos en la ecuación 22, obteniendo así la ecuación que se ajusta a la gráfica:

$$Y = a + bx$$

$$Y = 1,28 + 0,67x$$

Con la ecuación que se ajusta a la gráfica, se calcula el valor de correlación (R^2) mediante la siguiente ecuación 25

$$R^2 = 1 - \frac{Se^2}{S^2y}$$

Donde:

Se= Error Estimado

S^2y =Varianza de la variable separable

Para obtener el valor del coeficiente de correlacion (R^2) se debe calcular el Error estimado (ecuacion 26) ,y la varianza de la variable separable (ecuacion 27).

Error estimado

$$Se = \sqrt{\frac{\Sigma y^2 - a\Sigma y - b\Sigma x * y}{n - 2}} =$$

$$\sqrt{\frac{48,92 - 1,28(16,43) - 0,67(40,84)}{6 - 2}} = 0,36$$

Varianza de la variable separable

$$S^2y = \frac{\Sigma y^2}{n} - \bar{y}^2 = \frac{48,92}{6} - 2,74^2$$

$$S^2y = 0,64$$

Con los valores calculados anteriormente la correlación se describe de la siguiente manera:

$$R^2 = 1 - \frac{(0,36)^2}{0,64} = 0,8$$

Los valores calculados anteriormente demuestran que el grado de ajuste es apreciable, otorgando así una alta fiabilidad de los datos obtenidos, para mediante ellos poder realizar la gráfica de tendencia demostrada en el gráfico 5-11.

5.2.3.3 *Gráfica de tendencia de la desalineación angular vertical vs rms total.* La desalineación Angular vertical provoca un incremento de RMS total mientras aumenta el grado de desalineación observado en el gráfico 5-11, por lo cual se comprueba que el módulo cumple la función para la cual fue construido.

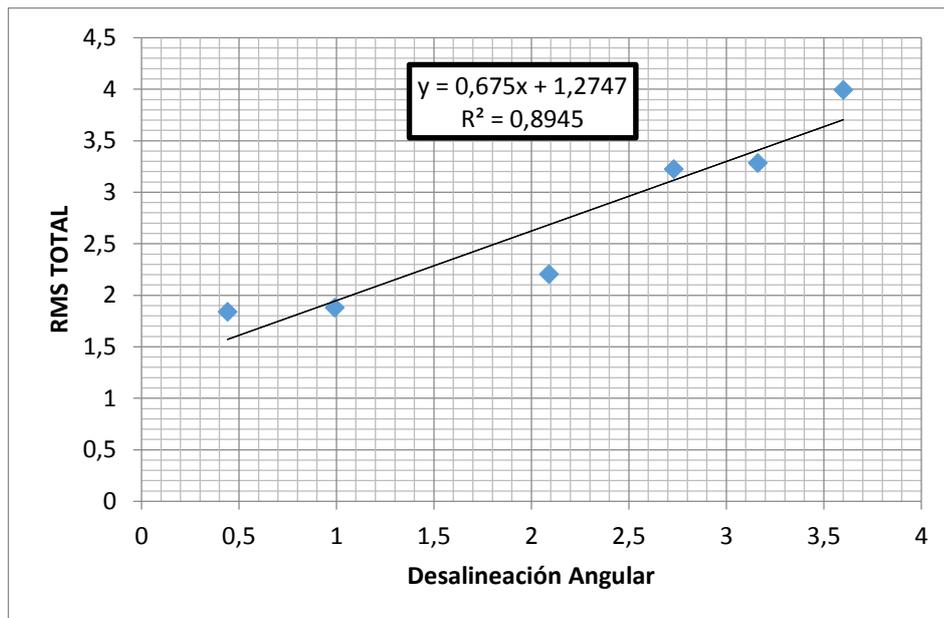


Gráfico 5-11. Tendencia de la desalineación angular vertical vs. Rms total

5.2.3.4 *Tabulación del consumo energético vs la desalineación angular vertical.* Mediante esta tabulación se realiza el análisis de eficiencia energética vs la desalineación.

En donde, se evidencia mediante los datos expuestos en la tabla 5-11, que existe una relación directamente proporcional entre la desalineación y el aumento de consumo energético.

Tabla 5-11. Tabulación del consumo energético vs la desalineación angular vertical

Desalineación (Grados sexagesimales)	Potencia (w)
0,44°	651,7
0,99°	656,6
2,09°	662
2,73°	668,6
3,16°	669,5
3,6°	682,4

5.2.3.5 *Grafica de tendencia de la desalineación angular vertical vs Potencia.*
Utilizando los valores de la tabla 5-11, se realizó la gráfica de desalineación vs potencia, evidenciando un incremento del consumo energético a medida que aumenta la desalineación.

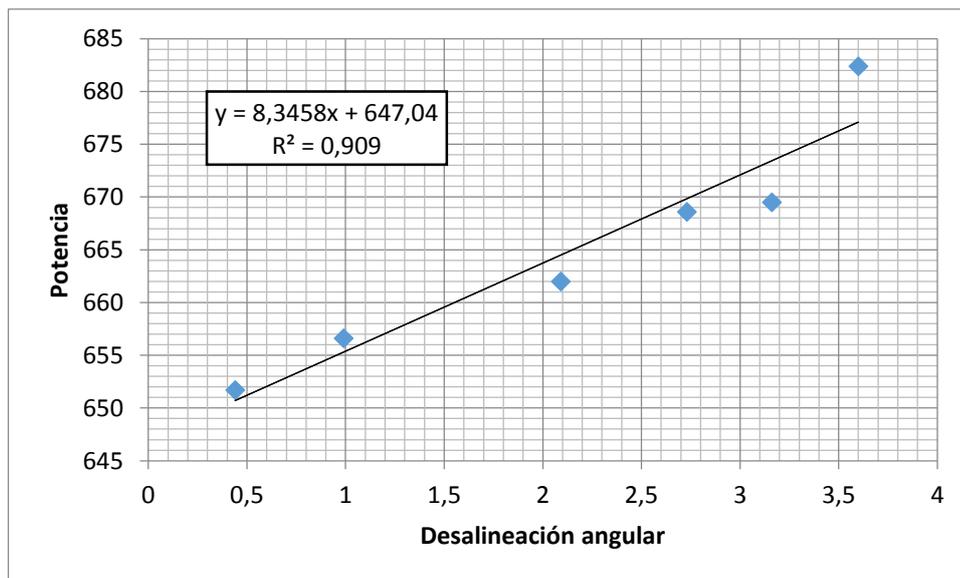


Gráfico 5-12. Tendencia de la desalineación angular vertical vs. Potencia

CAPÍTULO IV

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

El módulo de pruebas construido, cumple satisfactoriamente la función de simular desalineación paralela, desalineación angular horizontal, y desalineación angular vertical en sistemas de transmisión de potencia con polea.

El módulo simulador de fallas se construyó en base a la selección correcta de los elementos que lo componen como: motor de 1 Hp que genera la potencia requerida por el sistema, la selección de un alterador para generar la carga en el sistema de transmisión, las poleas conductoras como conducida y la correa trapezoidal que proporciona la transmisión de potencia del sistema.

El módulo de simulación construido es capaz de generar satisfactoriamente los tres tipos de desalineación de poleas como son: Desalineación paralela hasta 6 mm de desplazamiento, Desalineación Angular Horizontal hasta $3,26^\circ$ de desplazamiento, Desalineación Angular vertical hasta los $3,6^\circ$ de desplazamiento

El módulo construido brinda la facilidad para tomar mediciones del consumo energético, evidenciando el incremento del consumo de energía a medida que incrementa la desalineación.

La metodología elaborada en el estudio es eficaz, ya que permite realizar mediciones correctas tanto de desalineación, vibraciones y consumo energético. Ayuda también a la utilización correcta de los equipos, necesarios para la toma de datos como el analizador de vibraciones y el analizador de la calidad de energía

6.2 Recomendaciones

La toma de datos de vibraciones y eficiencia energética, se deben realizar a intervalos como indica el capítulo 4 para evitar que la desalineación excesiva, provoque una sobrecarga en el motor y un desgaste prematuro de la banda de transmisión.

Para efectuar las diferentes desalineaciones de manera correcta, se debe seguir la metodología detallada en el capítulo cuatro, en donde se especifica de manera precisa y eficaz los métodos y materiales utilizados para cada desalineación.

Mantener el módulo en un lugar limpio y seco para evitar deterioro del mismo, así también cuando se presente una capa de óxido se debe rociar con aceite WD-40 para que el módulo se conserve en condiciones ideales.

Para cada desalineación se debe tener en cuenta el tensado óptimo de la correa para ello se recomienda la ejecución de un estudio, para mejorar el sistema de tensado del módulo construido.

Realizar un estudio que permita efectuar las distintas desalineaciones, pero con poleas de distintos diámetros y diferentes tipos de material de poleas, para conocer como repercuten en el ámbito vibracional y eficiencia energética.

Realizar una investigación más profunda con la ayuda de equipos de análisis Termográfico, para evidenciar como afecta el grado de desalineación en la temperatura del sistema, así también realizar un análisis costo-beneficio para determinar si el ahorro económico generado por una correcta alineación de poleas satisface la necesidad del mantenimiento proactivo.

BIBLIOGRAFÍA

A-MAQ, S.A. *Tutorial de vibraciones para mantenimiento Mecanico*. [En línea] Enero de 2005. [Consultado en: 15-25 de Abril de 2017.] Disponible en : http://www.mantenimientoplanificado.com/art%C3%ADculos%20PREDICTIVO_archivos/CURSO%20A%20MAQ.COM.pdf

BUDYNAS, Richard & NISBETT, Keith. *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. México: McGRAW-HILL/INTERAMERICANA, 2008, pp.17-18

CARDONA, Jhon Favio, et al., *Scientia et Technica*. Pereira: 2010, pp 67-69.

CEJAROSU. “Curso de analisis de vibraciones ”*Maquinas y mecanismos de transmision de movimientos*. [En línea] 2006. [Consultado el: 25 de Marzo de 2017.] Disponible en: http://concurso.cnice.mec.es/cnice2006/material107/imprenta/Textos/tx_mecanismos.pdf

CHAPRA, Steven C. *Métodos Numéricos*. Quinta. Mexico D.F.: McGraw-Hill,, 2007. p. 997.

CHARLOTTE., TECHNICAL ASSOCIATES OF. “Spanish Vibration Diagnostic Wall Chart”. *Lista Ilustrada de diagnóstico de vibraciones*. [En línea] 1996. [Consultado el: 22 de Abril de 2017.] Disponible en: [http:// www. Technicalassociates.net/spanish-wall-chart.html](http://www.Technicalassociates.net/spanish-wall-chart.html)

GONZÁLEZ REY, Gonzalo. “Apuntes para calculo de trasmisiones por correas en V”. [En línea] 1999. [Consultado el: 15 de Abril de 2017.] Disponible en: http://campusvirtual.edu.uy/archivos/mecanicageneral/MATERIAL%20BIBLIOGRAFICO%20TECNICO%20PARA%20APOYO%20DOCENTE/Material%20Didactico/CORREAS_MAESTRIA.pdf

HAMROCK, Bernard; J et al. *Elementos de Maquinas*. Primera. Mexico : s.n., 2000, pp. 833-836.

HIGINIO RUBIO, Alonso. "OCW - UC3M". *Diseño Mecánico, Transmisión por correas - I*. [En línea] 26 de Septiembre de 2011], pp 2-25 [Consultado el: 27 de Julio de 2017.] Disponible en: http://ocw.uc3m.es/ingenieria-mecanica/disenio-mecanico-1/material_clase/ocw_correas1.

HIGINIO RUBIO, Alonso. "OCW - UC3M." *Diseño Mecanico, Transmisión por correas - 2*. [En línea] 26 de Septiembre de 2011, pp 2 [Consultado: 14 de Agosto de 2017.] Disponible en: http://ocw.uc3m.es/ingenieria-mecanica/disenio-mecanico-1/material_clase/ocw_correas2.

INTRIAGO NACEVILLA, Darwin Alexander & MANCHAY LASCANO, Wélinton Javier Recaudacion e implementacion de un equipo para alineacion laser de bandas y poleas en el laboratorio de analaisi vibracional de la Escuela de Ingenieria de Mantenimiento de la ESPOCH. [En línea]. Tesis de Grado. Escuela Superior Politencia de Chimborazo, Facultad de Mecanica, Ingenieria De Mantenimiento. 2011. pp 16-22

[Consultado el: 11-07-2017.] Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/1669/1/25T00165.pdf>

ISO-10816-1. *Vibración mecánica, Evaluación de la vibración de la máquina mediante mediciones en piezas no giratorias, Parte 1: Rango de valores límite de la zona típica.*

LEONEDIS. “Poleas y sus clases”. *Las Poleas*. [En línea] 2012. [Consultado el: 25 de Marzo de 2017.] Disponible en: <http://luyvis.blogspot.com/2012/04/laspoleasy sus clases>.

MELILLO, Gabriel. “Full Blog”. *Metrología, Reloj Comparador/Palapador*. [En línea] 2012. [Consultado el: 27 de Julio de 2017.] Disponible en: <http://metrologia.fullblog.com.ar/reloj-comparador-palapador.html>

MYSZKA, David H. *Maquinas y Mecanismos*. Monterrey: Pearson educación, 2012. pp. 302-308.

NIETO, Carlos; et al, *Metal Mecanica, Elementos de maquinas, Montaje de correas y poleas en V*. Bogotá : SENA 6, 1985. pp. 5-40.

NTE INEN 2498. *Eficiencia energética en motores eléctricos estacionarios*. Primera. Quito : s.n., 2009. pp. 1-19.

OZAETA EIDELMAN, Alejandro; et al, “Diseño y generacion de trasiciones de potencia por correa trapezoidal en Solidworks mediante una aplicacio en Visual Basic”. [En línea] 2013. [Consultado el: 18 de Abril de 2017.] Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/rfing/v22n35/v22n35a04.pdf>

SINAIS. “Fundamentos de analisis de Vibración”. *Curso de analisis de vibraciones*. [En línea] 2013. [Consultado el: 06 de Abril de 2017.] Disponible en: http://www.Sinais.es/Recursos/Curso-vibraciones/fundamentos/vibracion_simple.html

TULIO PIOVAN, Marcelo. “Elementos de Máquinas”. *Metodología de selección de correas en V*. [En línea] 2013. [Citado el: 18 de Abril de 2017.] Disponible: http://www.frbb.utn.edu.ar/frbb/images/carreras/elementosdemaquinas/CasoEstudio11_2013.pdf

WHITE, Glen. *Introduccion al Analisis de Vibraciones*. Woburn : DLI, Azima, 2010. pp.16-130.