



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

**“MODELO EMPÍRICO DE INFLUENCIA DE LA
DESALINEACIÓN EN EL CONSUMO ENERGÉTICO EN UN
MOTOR ELÉCTRICO TRIFÁSICO ASINCRÓNICO JAULA DE
ARDILLA DE 5 HP”**

**FLORES IBARRA JOSÉ ENRIQUE
SILVA PINEDA FERNANDO VINICIO**

**TRABAJO DE TITULACIÓN
TIPO: PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**

**Previa a la obtención del título de:
INGENIERO DE MANTENIMIENTO**

**Riobamba- Ecuador
2017**

ESPOCH

Facultad de Mecánica

**CERTIFICADO DE APROBACIÓN
DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

28-04-2017

Yo recomiendo que el Trabajo de Titulación preparado por:

FLORES IBARRA JOSÉ ENRIQUE

Titulado:

**“MODELO EMPÍRICO DE INFLUENCIA DE LA DESALINEACIÓN EN EL
CONSUMO ENERGÉTICO EN UN MOTOR ELÉCTRICO TRIFÁSICO
ASINCRÓNICO JAULA DE ARDILLA DE 5 HP”.**

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

Ing. Julio Eduardo Cajamarca Villa
ASESOR

ESPOCH

Facultad de Mecánica

**CERTIFICADO DE APROBACIÓN
DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

28-04-2017

Yo recomiendo que el Trabajo de Titulación preparado por:

SILVA PINEDA FERNANDO VINICIO

Titulado:

**“MODELO EMPÍRICO DE INFLUENCIA DE LA DESALINEACIÓN EN EL
CONSUMO ENERGÉTICO EN UN MOTOR ELÉCTRICO TRIFÁSICO
ASINCRÓNICO JAULA DE ARDILLA DE 5 HP”.**

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

Ing. Julio Eduardo Cajamarca Villa
ASESOR

ESPOCH

Facultad de Mecánica

EXAMINACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

NOMBRE DEL ESTUDIANTE: FLORES IBARRA JOSÉ ENRIQUE

TRABAJO DE TITULACIÓN: “MODELO EMPÍRICO DE INFLUENCIA DE LA DESALINEACIÓN EN EL CONSUMO ENERGÉTICO EN UN MOTOR ELÉCTRICO TRIFÁSICO ASINCRÓNICO JAULA DE ARDILLA DE 5 HP”.

Fecha de Examinación: 2017-12-21

RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:

COMITÉ DE EXAMINACIÓN	APRUEBA	NO PRUEBA	FIRMA
Dr. Marco Antonio Haro Medina PRESIDENTE TRIB.DEFENSA			
Ing. Eduardo Segundo Hernández Dávila DIRECTOR			
Ing. Julio Eduardo Cajamarca Villa ASESOR			

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

RECOMENDACIONES: _____

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

Dr. Marco Antonio Haro Medina
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

ESPOCH

Facultad de Mecánica

EXAMINACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

NOMBRE DEL ESTUDIANTE: SILVA PINEDA FERNANDO VINICIO

TRABAJO DE TITULACIÓN: “MODELO EMPÍRICO DE INFLUENCIA DE LA DESALINEACIÓN EN EL CONSUMO ENERGÉTICO EN UN MOTOR ELÉCTRICO TRIFÁSICO ASINCRÓNICO JAULA DE ARDILLA DE 5 HP”.

Fecha de Examinación: 2017-12-21

RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:

COMITÉ DE EXAMINACIÓN	APRUEBA	NO PRUEBA	FIRMA
Dr. Marco Antonio Haro Medina PRESIDENTE TRIB.DEFENSA			
Ing. Eduardo Segundo Hernández Dávila DIRECTOR			
Ing. Julio Eduardo Cajamarca Villa ASESOR			

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

RECOMENDACIONES: _____

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

Dr. Marco Antonio Haro Medina
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

DERECHOS DE AUTORÍA

El 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.

Flores Ibarra José Enrique

Silva Pineda Fernando Vinicio

DECLARACION DE AUTENTICIDAD

Nosotros, Flores Ibarra José Enrique y Silva Pineda Fernando Vinicio, declaramos que el presente trabajo de titulación es de nuestra autoría y que los resultados del mismo son auténticos y originales. Los textos constantes en el documento que provienen de otra fuente están debidamente consultados y referenciados.

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

Flores Ibarra José Enrique

Cédula de Identidad: 150089301-9

Silva Pineda Fernando Vinicio

Cédula de Identidad: 060381697-6

DEDICATORIA

Dedico mi logro al Todopoderoso, por la paciencia y constancia brindada a lo largo de mi carrera.

A mis padres: Gonzalo Lupercio Flores Sánchez y María Donatila Ibarra Gavilanes, hermanos, y amigos, quienes creyeron siempre en mí.

A mi familia: Virginia y José Francisco quien es el ahínco de cada día.

José Enrique Flores Ibarra

El presente trabajo va dedicado en primer lugar a Dios y a la Virgen de Guayco, quienes han sido mis protectores colmándome de bendiciones todos estos años.

A mis padres: Marco Vinicio Silva Robalino y Elsa Elisa Pineda Villarroel quienes en base a su trabajo, sacrificio y enseñanzas me han proporcionado todo lo necesario para poder culminar con esta etapa en mi vida, gracias por ser los cimientos para la formación de la persona quien soy en la actualidad, todos mis logros se los debo a ustedes incluyendo este el más importante en este momento de mi vida.

A mi hermano, familiares y amigos por ser personas valiosas quienes han puesto su granito de arena y me han acompañado a lo largo de todos estos años.

Fernando Vinicio Silva Pineda

AGRADECIMIENTO

A Dios, por la existencia.

A mis padres, hermanos, amigos, por el apoyo desmesurado y constante.

A la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, en especial a la Escuela de Ingeniería de Mantenimiento, por la oportunidad de obtener una profesión, y ser una persona útil para la sociedad.

Agradezco al Ing. Eduardo Hernández e Ing. Julio Cajamarca, por la dirección y asesoramiento para la realización del presente trabajo de titulación.

José Enrique Flores Ibarra

Agradezco a Dios por todas las bendiciones recibidas a lo largo de la carrera y a mis padres ya que mediante su apoyo y amor debo esta meta cumplida.

A la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, en especial a la Escuela de Ingeniería de Mantenimiento, por haberme dado la oportunidad de cruzar por sus aulas y a las enseñanzas de cada uno de los profesores quienes han contribuido de una manera impecable para mi formación como Ingeniero de Mantenimiento.

De manera especial agradezco al Ing. Eduardo Hernández e Ing. Julio Cajamarca, quienes han sido los mentores y responsables para la culminación exitosa de la presente investigación.

Fernando Vinicio Silva Pineda

CONTENIDO

	Pág.
CAPÍTULO I.....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Planteamiento del problema	1
1.3. Justificación	2
1.4. Objetivos.....	2
1.4.1 <i>Objetivo general</i>	2
1.4.2 <i>Objetivos específicos</i>	2
1.5. Hipótesis.	3
1.5.1. <i>Variable dependiente.</i>	3
1.5.2. <i>Variable independiente.</i>	3
CAPÍTULO II	4
2. MARCO TEÓRICO.....	4
2.1. Estudio de la desalineación.....	4
2.1.1. Desalineación.....	4
2.1.1.1. <i>Desalineación paralela</i>	4
2.1.1.2. <i>Desalineación angular</i>	4
2.1.1.3. <i>Desalineación general</i>	5
2.1.2. <i>Incremento de temperatura por desalineación.</i>	5
2.1.3. <i>Causas de la desalineación.</i>	6
2.1.4. <i>Consecuencias de la desalineación</i>	6
2.2. Alineamiento de máquinas	7
2.2.1. <i>Deflexión.</i>	7
2.2.2. <i>Velocidad crítica.</i>	8
2.2.3. <i>Parámetros de alineamiento.</i>	8
2.2.4. <i>Angularidad, paralelismo y abertura.</i>	9
2.2.5. <i>Tolerancias de desalineación.</i>	11
2.2.6. <i>Causas de daños en máquinas rotatorias.</i>	12
2.2.7. <i>Pata coja.</i>	12
2.2.7.1. <i>Pata coja paralela.</i>	12
2.2.7.2. <i>Pata coja angular</i>	12
2.2.7.3. <i>La “pata rugosa”.</i>	13
2.2.7.4. <i>La pata coja puede ser causada por fuerzas externas.</i>	13
2.2.8. <i>Corrección con laines.</i>	14
2.2.9. <i>Métodos de alineación.</i>	14
2.2.9.1. <i>Regla y nivel.</i>	14
2.2.9.2. <i>Relojes comparadores de carátula.</i>	15

2.2.9.3.	<i>Alineamiento láser</i>	15
2.3.	Sistema de gestión de energía.....	16
2.3.1.	<i>Definición de SGE según ISO 50001</i>	16
2.3.2.	<i>Eficiencia energética</i>	16
2.3.3.	<i>Eficiencia energética eléctrica (e3)</i>	16
2.3.4.	<i>Conceptos básicos energéticos</i>	17
2.3.4.1.	<i>Potencia Aparente(S)</i>	17
2.3.4.2.	<i>Potencia activa (P)</i>	17
2.3.4.3.	<i>Potencia reactiva (Q)</i>	18
2.3.4.4.	<i>Triángulo de potencias</i>	18
2.3.4.5.	<i>Factor de potencia</i>	18
2.3.4.6.	<i>Eficiencia en motores eléctricos</i>	19
2.3.5.	<i>Balance de energía</i>	19
2.3.6.	<i>Incremento de energía de un sistema, ΔE sistema</i>	20
2.4.	Ministerio de Electricidad y Energía Renovable (MEER) y el Plan Nacional de Eficiencia Energética (PLANEE).....	20
2.4.1.	<i>Situación del sector Energético en el Ecuador</i>	21
2.4.2.	<i>Eje industria</i>	21
2.5.	Estudio de vibraciones.....	22
2.5.1.	<i>Vibración</i>	22
2.5.2.	<i>Medición de la amplitud de vibración</i>	23
2.5.3.	<i>Frecuencia natural</i>	23
2.5.4.	<i>Resonancia</i>	23
2.5.5.	<i>Transductores de vibración</i>	24
2.5.6.	<i>Acelerómetro</i>	24
2.5.6.1.	<i>Acelerómetro piezoeléctrico</i>	24
2.5.7.	<i>Ubicación de los puntos de prueba</i>	24
2.5.8.	<i>Análisis de espectros</i>	25
2.5.8.1.	<i>La transformada de Fourier</i>	25
CAPÍTULO III.....		26
3.	METODOLOGÍA.....	26
3.1.	Características del módulo de desalineación.....	26
3.2.	Pruebas de funcionamiento del módulo de desalineación.....	27
3.3.1.	<i>Carga suministrada</i>	27
3.3.2.	<i>Pruebas de funcionamiento de la instalación eléctrica</i>	27
3.3.3.	<i>Frecuencia natural de la estructura del módulo de desalineación</i>	32
3.2.3.1.	<i>Frecuencias naturales medidas en el módulo de desalineación</i>	32
3.3.	Funcionamiento del módulo de desalineación.....	35
3.4.1.	<i>Proceso de puesta en marcha y desconexión</i>	35
3.4.2.	<i>Proceso de alineación con alineador láser OPTALING PLUS</i>	35
3.4.	Método para las mediciones.....	36
3.4.1.	<i>Proceso configuración de MAINTraQ Predictive 2.1</i>	36
3.4.2.	<i>Transferencia de datos al equipo VIBRACHECK ABG200</i>	36
3.4.3.	<i>Recopilación de datos en desalineación paralela</i>	37

3.4.4.	<i>Recopilación de datos en desalineación angular.</i>	37
3.4.5.	<i>Descarga de mediciones al software MAINTraQ Predictive 2.1.</i>	40
3.4.6.	<i>Recopilación de datos del analizador de la energía Fluke 435 II.</i>	40
3.4.7.	<i>Descarga de datos del analizador de la calidad de energía Fluke 435 II.</i>	41

CAPÍTULO IV 42

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS 42

4.1.	Resultados con acople rígido de desalineación y vibración	43
4.1.1.	<i>Desalineación paralela vs vibración LGV.</i>	43
4.1.2.	<i>Desalineación paralela vs vibración LGA.</i>	46
4.1.3.	<i>Desalineación angular vs vibración LGV.</i>	48
4.1.4.	<i>Desalineación angular vs vibración LGA.</i>	50
4.2.	Resultados con acople flexible de desalineación y vibración	52
4.2.1.	<i>Desalineación paralela vs vibración LGV.</i>	52
4.2.2.	<i>Desalineación paralela vs vibración LGA.</i>	55
4.2.3.	<i>Desalineación angular vs vibración LGV.</i>	57
4.2.4.	<i>Desalineación angular vs vibración LGA.</i>	59
4.3.	Resultados con acople rígido de desalineación y consumo energético	61
4.3.1.	<i>Desalineación paralela vs consumo energético.</i>	61
4.3.2.	<i>Desalineación angular vs consumo energético.</i>	63
4.4.	Resultados con acople flexible de desalineación y consumo energético	66
4.4.1.	<i>Desalineación paralela vs consumo energético.</i>	66
4.4.2.	<i>Desalineación angular vs consumo energético.</i>	68
4.5.	Interpretación y evaluación de resultados de vibraciones	70
4.6.	Interpretación y evaluación de resultados de consumo energético	72

CAPITULO V 73

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES. 73

5.1	Conclusiones	73
5.2	Recomendaciones	73

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

INDICE DE TABLAS

Tabla 2-1. Tolerancias de desalineación	11
Tabla 2-2. Objetivos específicos, líneas de acción e indicadores en el Eje Industrial...	22
Tabla 2-3. Transductores de vibración.....	24
Tabla 3-1. Valores de temperatura inicial del interruptor principal.....	29
Tabla 3-2. Valores de temperatura inicial del interruptor secundario	29
Tabla 3-3. Valores de temperatura del interruptor principal.....	30
Tabla 3-4. Valores de temperatura del interruptor secundario	31
Tabla 3-5. Frecuencias naturales medidas en el módulo de desalineación.....	34
Tabla 3-6. Distancia del nivel de desalineación proporcional o global.	39
Tabla 3-7. Distancia del nivel de desalineación proporcional o global.	39
Tabla 4-1. Valores de desalineación paralela vs vibración LGV.....	44
Tabla 4-2. Valores de desalineación paralela vs vibración LGA.....	46
Tabla 4-3. Valores de desalineación angular vs vibración LGV	49
Tabla 4-4. Valores de desalineación angular vs vibración LGA	51
Tabla 4-5. Valores de desalineación paralela vs vibración LGV.....	53
Tabla 4-6. Valores de desalineación paralela vs vibración LGA.....	56
Tabla 4-7. Valores de desalineación angular vs vibración LGV	58
Tabla 4-8. Valores de desalineación angular vs vibración LGA	60
Tabla 4-9. Valores de desalineación paralela vs consumo energético.....	62
Tabla 4-10. Valores de desalineación angular vs consumo energético	64
Tabla 4-11. Valores de desalineación paralela vs consumo energético.....	66
Tabla 4-12. Valores de desalineación angular vs consumo energético	69
Tabla 4-13. Resultado de vibraciones	70
Tabla 4-14. Resultados de consumo energético.....	72

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2-1. Desalineación paralela.....	4
Figura 2-2. Desalineación angular.....	5
Figura 2-3. Desalineación general.....	5
Figura 2-4. Incremento de la temperatura por desalineación.....	6
Figura 2-5. Alineamiento de máquinas.....	7
Figura 2-6. Deflexión.....	7
Figura 2-7. Velocidad crítica.....	8
Figura 2-8. Tipos de desalineación.....	9
Figura 2-9. Angularidad.....	9
Figura 2-10. Paralelismo.....	10
Figura 2-11. Abertura.....	10
Figura 2-12. Pata coja paralela.....	12
Figura 2-13. Pata coja angular.....	13
Figura 2-14. Pata rugosa.....	13
Figura 2-15. Pata coja por fuerzas externas.....	14
Figura 2-16. Lainas.....	14
Figura 2-17. Relojes comparadores de carátula.....	15
Figura 2-18. Alineación mediante relojes comparadores.....	15
Figura 2-19. Alineador láser.....	16
Figura 2-20. Triángulo de potencias.....	18
Figura 2-21. Acelerómetro piezoeléctrico.....	24
Figura 2-22. Ubicación del acelerómetro.....	25
Figura 2-23. Procesado FFT de una onda vibratoria compleja.....	25
Figura 3-1. Partes módulo de desalineación.....	27
Figura 3-2. Termograma condición inicial interruptor principal.....	29
Figura 3-3. Termograma condición inicial interruptor secundario.....	30
Figura 3-4. Termograma condición final interruptor principal.....	31
Figura 3-5. Termograma condición final interruptor secundario.....	31
Figura 3-6. Frecuencia natural de LGV.....	32
Figura 3-7. Frecuencia natural de LGA.....	33
Figura 3-8. Frecuencia natural de LMV.....	33

Figura 3-9. Frecuencia natural de LMA	34
Figura 3-10. Condición antes de desalinear el módulo de desalineación	38
Figura 3-11. Valor de desalineación proporcional o global	38
Figura 4-1. Desalineación paralela vs vibración LGV	44
Figura 4-2. Gráfico de desalineación paralela vs vibración LGV	45
Figura 4-3. Desalineación paralela vs vibración LGA	46
Figura 4-4. Gráfico de desalineación paralela vs vibración LGA	48
Figura 4-5. Desalineación angular vs vibración LGV	48
Figura 4-6. Gráfico de desalineación angular vs vibración LGV	50
Figura 4-7. Desalineación angular vs vibración LGA	50
Figura 4-8. Gráfico de desalineación angular vs vibración LGA	52
Figura 4-9. Desalineación paralela vs vibración LGV	53
Figura 4-10. Gráfico de desalineación paralela vs vibración LGV	55
Figura 4-11. Desalineación paralela vs vibración LGA	55
Figura 4-12. Gráfico de desalineación paralela vs vibración LGA	57
Figura 4-13. Desalineación angular vs vibración LGV	57
Figura 4-14. Gráfico de desalineación angular vs vibración LGV	59
Figura 4-15. Desalineación angular vs vibración LGA	59
Figura 4-16. Gráfico de desalineación angular vs vibración LGA	61
Figura 4-17. Fluctuación de la potencia activa en la desalineación paralela.....	62
Figura 4-18. Gráfico de desalineación paralela vs consumo energético	63
Figura 4-19. Fluctuación de la potencia activo en la desalineación angular	64
Figura 4-20. Gráfico de desalineación angular vs consumo energético	65
Figura 4-21. Fluctuación de la potencia activa en la desalineación paralela.....	66
Figura 4-22. Gráfico de desalineación paralela vs consumo energético	68
Figura 4-23. Fluctuación de la potencia activa en desalineación angular	68
Figura 4-24. Gráfico de desalineación angular vs pérdidas de energía	70

LISTA DE ABREVIACIONES

CA	Corriente alterna
N.O	Normalmente abierto
N.C	Normalmente cerrado
CAD	Diseño Asistido por Computadora.
Mm	Milímetros
RMS	Raíz cuadrática media.
Vca	Voltaje de corriente alterna
MATJA	Motor asíncrono trifásico jaula de ardilla.
Mbep	Mega barril equivalente de petróleo
PLANEE	Plan Nacional de Eficiencia Energética del Ecuador
ESCOs	.Compañías de Servicios Energéticos
MEER	Ministerio de Electricidad y Energía Renovable
PNBV	Plan Nacional del Buen Vivir.
LMV	Lado motor vertical
LMH	Lado motor horizontal.
LMA	Lado motor axial.
LGV	Lado generador vertical
LGH	Lado generador horizontal
LGA	Lado generador axial

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Dimensiones linternas	78
Anexo B. Fichas técnicas de módulo de desalineación	79
Anexo C. Corriente a plena carga de motores trifásicos de corriente alterna	82
Anexo D. Ampacidad de conductores	83
Anexo E. Pasos para medir la frecuencia natural de la estructura del módulo de desalineación.....	84
Anexo F. Circuito de mando y potencia del módulo de desalineación	86
Anexo G. Proceso de alineación con alineador láser OPTALING PLUS.....	87
Anexo H. Proceso de configuración de MAINTraQ Predictive 2.1.....	91
Anexo I. Transferencia de datos al equipo Vibracheck ABG200.	95
Anexo J. Recopilación de datos en desalineación paralela.	96
Anexo K. Descarga de mediciones al software MAINTraQ Predictive 2.1	101
Anexo L. Recopilación de datos del analizador de la energía Fluke 435 II.....	102
Anexo M. Descarga de datos del analizador de la calidad de la energía Fluke 435 II.	106
Anexo N. Valores críticos del coeficiente de correlación de Pearson r	109
Anexo O. Guía de operación del módulo de desalineación	110
Anexo P. Check List del módulo de desalineación	112
Anexo Q. Guías de laboratorio del módulo de desalineación	113
Anexo R. AMEF y plan de mantenimiento del módulo de desalineación	145
Anexo S. Manual de operación del módulo de desalineación	156
Anexo T. Planos mecánicos del módulo de desalineación.....	160

RESUMEN

Se desarrolló mediante observaciones experimentales, de la desalineación e incremento del consumo energético, para extraer un modelo matemático empírico que cuantifique estas pérdidas energéticas con la finalidad de evidenciar el impacto económico de la desalineación relacionado con el consumo energético. El motor utilizado fue de 3,7 kW de potencia con velocidad nominal de rotación de 1710 rpm, con una carga resistiva constante de 3,021 kW, correspondiente al 81,67% de la carga nominal. Inicialmente se alineó el motor eléctrico con el generador y mediante una mesa de precisión milimétrica se proporcionó niveles de desalineación con un intervalo de 0,1mm hasta alcanzar 1mm de desalineación paralela y 17,45 miliradianes de desalineación angular con el acople flexible, y 1mm y 8,57 miliradianes con acoplamiento rígido. Las mediciones de consumo de energía se obtuvieron mediante el analizador de la calidad de la energía Fluke 435 II. La vibración mecánica fue mayor cuando se utilizó un acoplamiento rígido que un acoplamiento flexible indicado por la pendiente y ordenada en el origen encontradas. Hubo mayor consumo energético cuando se utilizó un acoplamiento rígido que un acoplamiento flexible. Además, la relación encontrada entre las variables dependientes e independiente es lineal con una mayor pendiente cuando se utilizó el acople rígido, La dispersión de los datos con la respecto a la línea de tendencia se realizó mediante el estadístico “r” de Pearson resultando significativas al 1%. Se observó que las vibraciones mecánicas y consumo energético son mayores cuando se utilizó un acoplamiento rígido, por ende, el acoplamiento flexible absorbió las vibraciones los cuales son utilizados en la mayoría de aplicaciones industriales. El conocimiento de las consecuencias de falla provocado por la desalineación ayudará a la toma de decisiones en la industria a mantener las máquinas en un contexto operacional adecuado para así mejorar la eficiencia energética.

PALABRAS CLAVES: <CONSUMO ENERGÉTICO>, <DESALINEACIÓN PARALELA>, <DESALINEACIÓN ANGULAR >, <VIBRACIONES MECÁNICAS>, <HOJAS DE CÁLCULO>, <MOTOR ELÉCTRICO TRIFÁSICO ASINCRÓNICO JAULA DE ARDILLA >.

ABSTRACT

The misalignment and increase of the energetic intake to extract an empiric math model was developed through experimental observations, in order to quantify the energetic loss and prove the economic impact on misalignment towards energetic intake. The engine used was one of 3, 7 kW power, with rotation speed of 1710 rpm and constant loading of 3,021 kW, getting 81,67% from nominal loading. First the electric engine was aligned with the power unit by using a millimeter precision table, and then the levels of misalignment were tested as well, having an interval from 0, 1 mm to 1mm in parallel misalignment and 17,45 milliradians of angular misalignment using the flexible coupling and from 1 mm to 8,57 milliradians using rigid coupling. The power intake measurements were obtained by means of the energy quality analyzer Fluke 435 II. The mechanic vibration was higher when using a rigid coupling, and so a higher power intake. The relationship between dependent and independent variables was linear and the data dispersion regarding to the tendency line was developed by using the Pearson “r” statistic, resulting meaningful at 1%. The mechanic vibrations and power intake were higher when using a rigid coupling thus the flexible coupling absorbed the vibrations used in most of industrial applications. All in all the awareness of failures provoked by misalignments will help to make decisions and keep the machines efficiently working.

KEYWORDS: <POWER INTAKE>, <PARALLEL MISALIGNMENT>, <ANGULAR MISALIGNMENT>, <MECHANIC VIBRATIONS>, <ANGULAR MISALIGNMENT>, <CALCULUS SHEETS>, <THREE-PHASED ELECTRIC ENGINE SQUIRREL CAGE>.

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

En el laboratorio de Diagnóstico Técnico y Eficiencia Energética de la Facultad de Mecánica de la ESPOCH, existe módulos destinados a simular diversos modos de falla, tales como: desequilibrio, desalineación de poleas, remolino de aceite, vibración.

El módulo que es utilizado para el estudio del incremento de la vibración en función del nivel de desalineación también puede ser empleado para el análisis del incremento del consumo de energía y la desalineación colocando una carga resistiva constante adecuada y así evidenciar el impacto económico de la desalineación relacionado con el consumo energético y promover la eficiencia energética en las industrias.

La Constitución de la República del Ecuador, publicada en el Registro Oficial 449 del 20 de octubre de 2008, en el artículo 413 establece que “El Estado promoverá la eficiencia energética, el desarrollo y uso de prácticas y tecnologías ambientalmente limpias y sanas, así como de energías renovables diversificadas, de bajo impacto, que no pongan en riesgo la soberanía alimentaria, el equilibrio ecológico de los ecosistemas y el derecho al agua”, cuya responsabilidad de la elaboración del Plan Nacional de Eficiencia Energética es el Ministerio de Electricidad y Energías Renovables (MINISTERIO DE ELECTRICIDAD Y ENERGÍAS RENOVABLES, 2016).

1.2. Planteamiento del problema

La mayoría de procesos productivos requieren energía mecánica, la misma es transformada por motores eléctricos, el correcto montaje de los mismos es importante para que el sistema alcance un alto rendimiento, sino es así se produce un modo de fallo conocido como desalineación.

Las empresas ignoran las consecuencias de éste modo de falla, provocando un alto consumo de energía, disminuyendo el rendimiento de los motores eléctricos y limitando la generación de utilidades.

Es conocido que la desalineación incrementa el consumo energético. Este incremento de consumo energético es una pérdida de energía producto de la desalineación. Lo que aún no está definido es el modelo matemático que relaciona estas dos variables.

1.3. Justificación

La generación de utilidades es el objetivo de cualquier empresa, pero reducir las pérdidas económicas sería lo ideal, por lo tanto, todas las actividades que se implementen y realicen para incrementar la eficiencia de las máquinas industriales son justificadas.

Mediante los ensayos experimentales se analizará el rendimiento del motor a 1710 rpm y niveles de desalineación para obtener los datos necesarios que permitirán determinar una ecuación empírica.

Con la ecuación empírica determinada, se obtendrá una aproximación de la incidencia de las pérdidas energéticas producidas por la desalineación, el mismo que permitirá evaluar las pérdidas de energía originadas.

1.4. Objetivos

1.4.1 *Objetivo general*

Desarrollar un modelo empírico de la influencia de la desalineación en el consumo energético en un motor trifásico asíncrono jaula de ardilla de 5 HP.

1.4.2 *Objetivos específicos*

Realizar el análisis energético entre el 70-85% de la carga nominal del MTAJA.

Suministrar niveles de desalineación en las direcciones angular y paralela.

Deducir las ecuaciones empíricas entre la desalineación y vibración, desalineación y consumo energético.

Diseñar el manual de operación, plan de mantenimiento y guías de laboratorio para el módulo de pruebas.

1.5. Hipótesis.

El incremento de las pérdidas energéticas y vibración mecánica en los motores eléctricos trifásicos asincrónicos jaula de ardilla es función del nivel de desalineación entre el eje motriz y el acoplado

1.5.1. Variable dependiente. El incremento de las pérdidas energéticas y vibración mecánica en los motores eléctricos trifásicos asincrónicos jaula de ardilla.

1.5.2. Variable independiente. Nivel de desalineación entre el eje motriz y el acoplado.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO.

2.1. Estudio de la desalineación

2.1.1. Desalineación. Ocurre cuando las líneas centrales de flechas acopladas no son colineales.

2.1.1.1. Desalineación paralela. Produce una fuerza de cizallamiento y un momento flector en la extremidad acoplada de cada flecha, niveles de vibración altos en 2x y en 1x en direcciones radiales o tangenciales. Los niveles axiales 1x y 2x serán bajos y su fase estará opuesta.

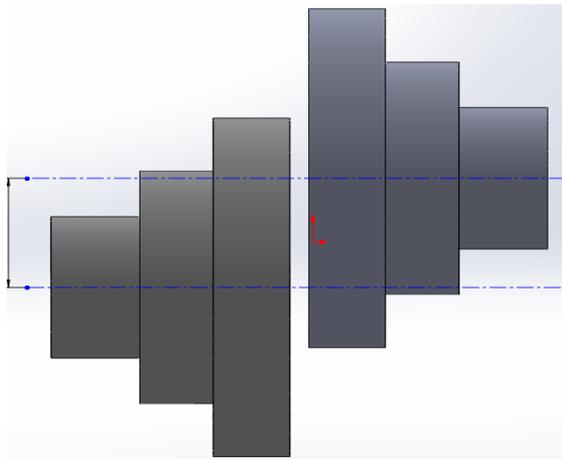


Figura 2-1. Desalineación paralela.

Fuente: Autores

2.1.1.2. Desalineación angular. Produce un momento de flexión en cada flecha, lo cual genera una fuerte vibración en 1x, y algo de vibración en 2x en la dirección axial en ambos rodamientos y de fase opuesta. También habrá niveles relativamente fuertes en direcciones radiales y/o transversales 1x y 2x, pero en fase.

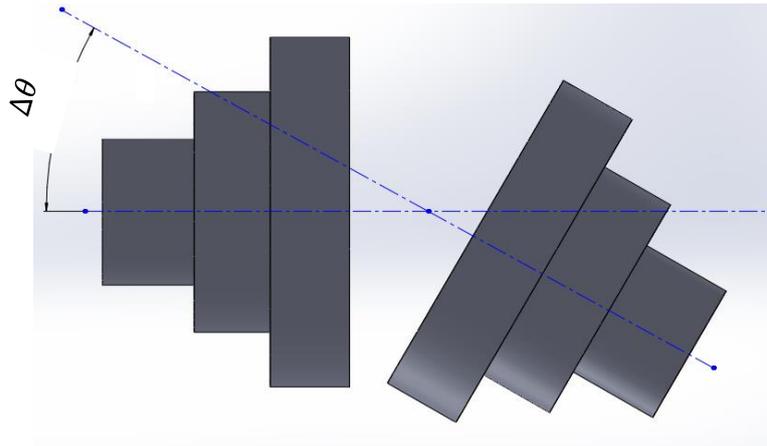


Figura 2-2. Desalineación angular
Fuente: Autores

2.1.1.3. *Desalineación general.* Es una combinación de los tipos descritos anteriormente. El diagnóstico está basado en picos 2x más fuertes que los picos 1x y en la existencia de picos axiales 1x y 2x (WHITE, 2010).

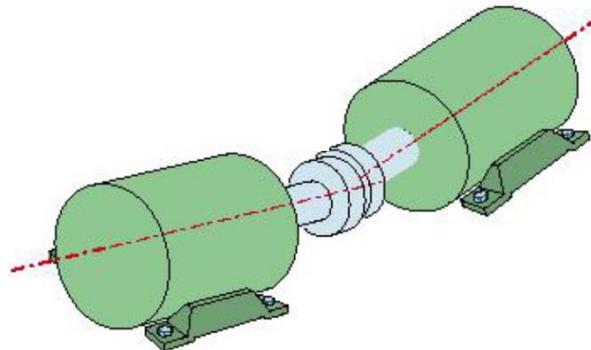


Figura 2-3. Desalineación general
Fuente: (BANNISTER, 2004)

2.1.2. *Incremento de temperatura por desalineación.* La mejor alineación se alcanza cuando los niveles de vibración son bajos, mejoran cuando estos cada vez tienden a cero, sería lo ideal pero las condiciones de funcionamiento no lo permiten, pero cuanto más se puede reducir será mejor.

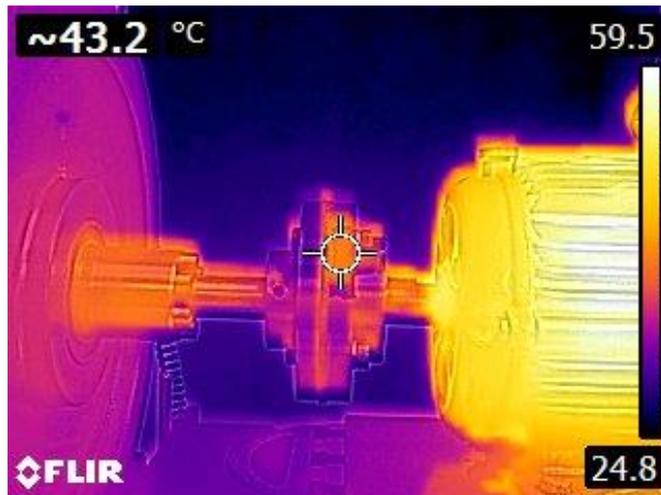


Figura 2-4. Incremento de la temperatura por desalineación
Fuente: Autores

2.1.3. Causas de la desalineación. La desalineación está causada por las condiciones siguientes:

- Sobreestimación de la rigidez del material de la estructura de la máquina durante el diseño, lo cual provoca deformaciones excesivas durante el funcionamiento.
- Subestimación de las fuerzas y momentos derivados del funcionamiento, que producen igualmente una deformación excesiva.
- Montaje de la máquina sobre cimentaciones infradimensionadas o en mal estado, permitiendo micromovimientos no deseados de la misma.
- Dilataciones producidas por cambios de temperatura en la bancada, ejes, rodamientos, etc., que son considerables y que se están asociados al funcionamiento de la máquina.
- Bancadas o amarres en mal estado debido probablemente a la aparición de grietas por fatiga, errores en el apriete de pernos de amarre (SÁNCHEZ MARÍN, y otros, 2007).

2.1.4. Consecuencias de la desalineación: La desalineación tiene por consecuencias las siguientes:

- Desgaste prematuro de rodamientos, juntas, ejes y acoplamientos
- Altas temperaturas en rodamientos y acoplamientos
- Exceso de vibraciones
- Tornillos de fundamento aflojados
- Rotura de ejes en el lado interior
- Alto consumo de corriente (PRÜFTECHNIK, 2017)

2.2. Alineamiento de máquinas

Es dejar los ejes o flechas colinealmente, el cual es el punto de transferencia de energía de un eje a otro, los dos ejes deben rotar sobre su mismo eje, siendo geoméricamente colineales en toda dimensión, para minimizar esfuerzos del acople y desgaste de sus apoyos.

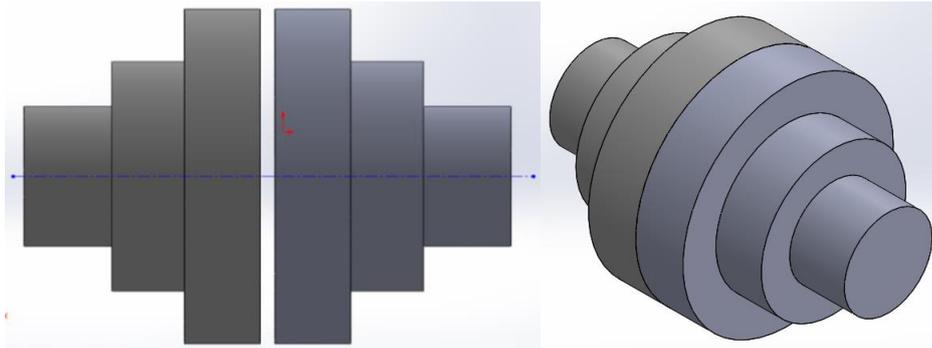


Figura 2-5. Alineamiento de máquinas

Fuente: Autores

2.2.1. Deflexión. La cantidad de deflexión depende de varios factores tales como rigidez de los ejes, peso entre apoyos y voladizo, diseño de los rodamientos y distancia entre los apoyos (BANNISTER, 2004).

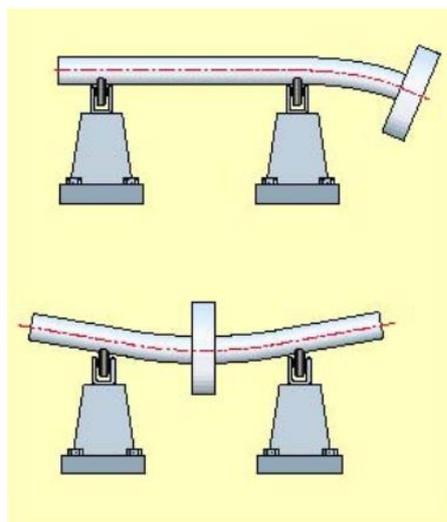


Figura 2-6. Deflexión

Fuente: (BANNISTER, 2004)

2.2.2. Velocidad crítica. La velocidad crítica se produce cuando la frecuencia de excitación es un orden de la velocidad de operación de una máquina. (ESHLEMAN, 2002).

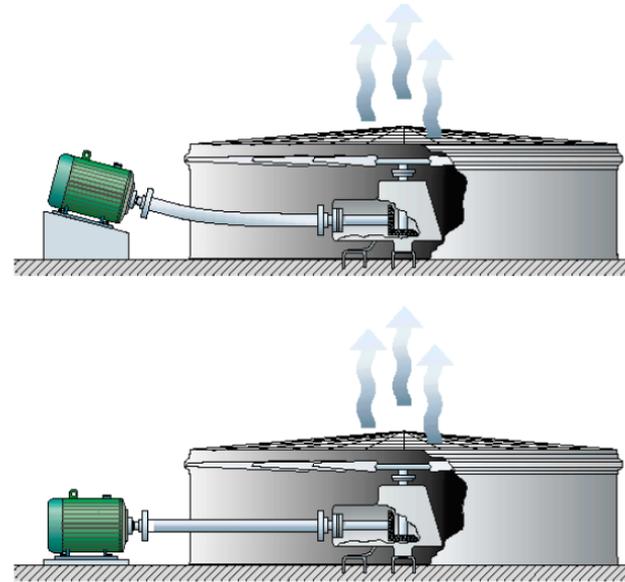


Figura 2-7. Velocidad crítica

Fuente: (BANNISTER, 2004)

2.2.3. Parámetros de alineamiento. Los cuatro parámetros que describen esta situación son: Paralelismo vertical, paralelismo horizontal, angularidad vertical y angularidad horizontal.

Pueden ser en un mismo plano, cuando ocurre en planos diferentes hay inconvenientes al momento de alinear. Si se tiene una combinación de parámetros lo recomendable es ir corrigiendo cada parámetro, así disminuir el grado de desalineación.

Estos normalmente ocurren simultáneamente en varios grados, y cualquier condición de alineamiento entre dos ejes puede describirse exactamente en términos de la combinación de estos cuatro parámetros. El alineamiento correcto considera el encuentro geométrico de los centros de los ejes y no las superficies de los ejes, acoples o máquinas.

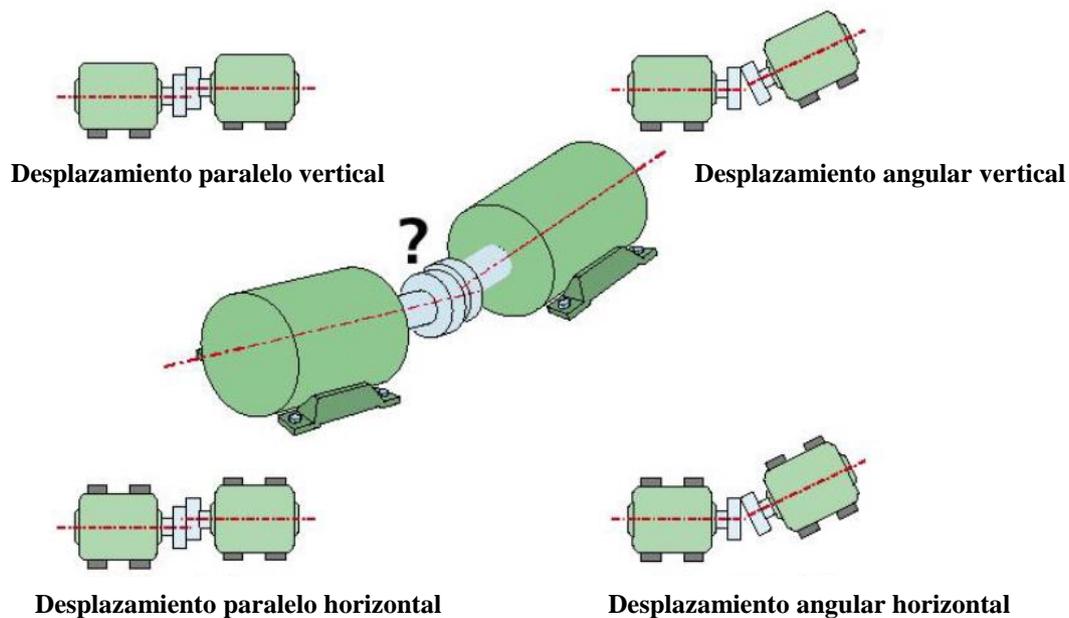


Figura 2-8. Tipos de desalineación

Fuente: (BANNISTER, 2004)

2.2.4. Angularidad, paralelismo y abertura. *Angularidad.* Es el ángulo entre dos ejes de rotación, puede expresarse directamente como un ángulo en grados o miliradianes.

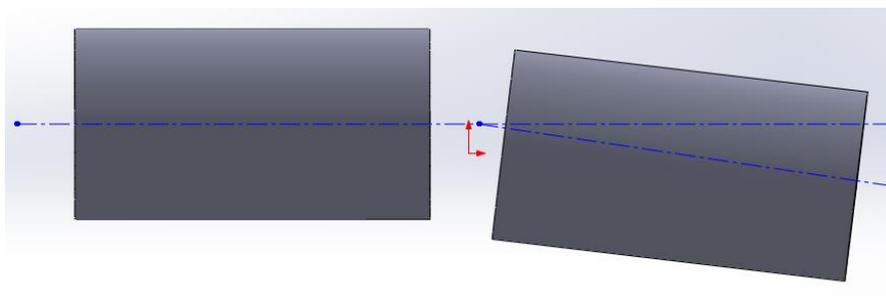


Figura 2-9. Angularidad

Fuente: Autores

Paralelismo. Es cuando dos ejes o flechas tienen la misma pendiente en toda su dimensión, las mismas pueden ser colineales o tener un desplazamiento vertical desde sus ejes geométricos (ESHLEMAN, 2002).

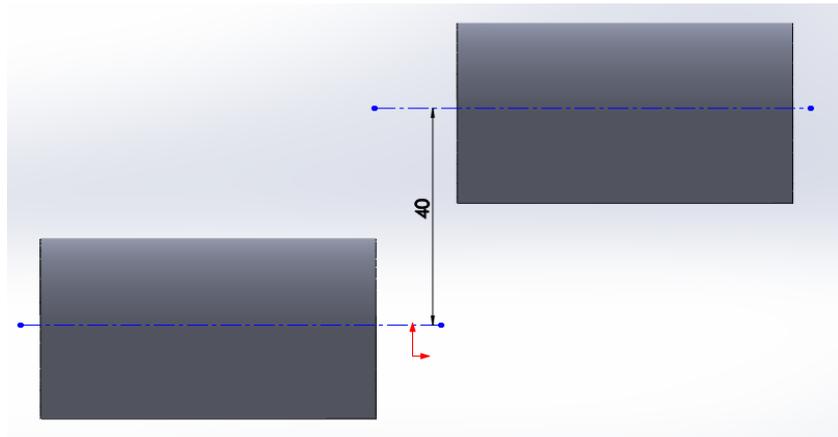


Figura 2-10. Paralelismo

Fuente: Autores

Abertura. Se aplica a acoplamientos donde la longitud axial del elemento flexible o la longitud axial entre los elementos flexibles es igual o menor que el diámetro del acople (BANNISTER, 2004).

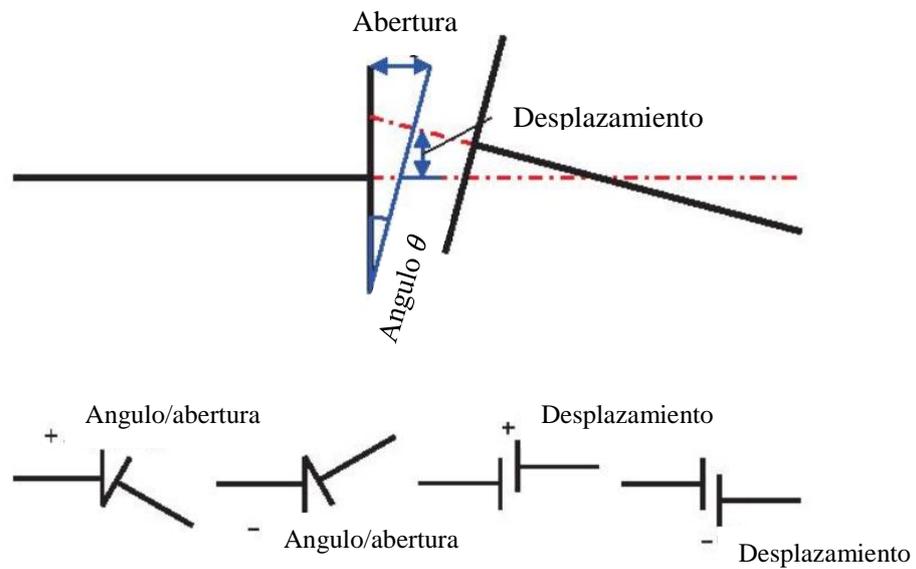
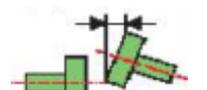
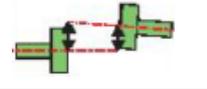


Figura 2-11. Abertura

Fuente: (BANNISTER, 2004)

2.2.5. Tolerancias de desalineación. Las tolerancias sugeridas por Pruftechnik en alineamiento de ejes no deben excederse a los mostrados en la Tabla 1 (PRÜFTECHNIK, 2017).

Tabla 2-1. Tolerancias de desalineación

	RPM	Métrico (mm)		Pulgadas (mils)	
		Aceptable	Excelente	Aceptable	Excelente
<p>Acople flexible corto</p> <p>Desplazamiento:</p> 	600		0	9.0	5.0
	750	0.19	0.09		
	900			6.0	3.0
	1200			4.0	2.5
	1500	0.09	0.06		
	1800			3.0	2.0
	3000	0.06	0.03		
	3600			1.5	1.0
	6000	0.03	0.02		
	7200			1.0	0.5
<p>Angularidad:</p> <p>Valores métricos- gap diferencia por 100mm de diámetro de acoplamiento</p> <p>Valores por pulgadas- gap diferencia por 10 pulgadas diámetro de acoplamiento</p> 	600			15.0	10.0
	750	0.13	0.09		
	900			10.0	7.0
	1200			8.0	5.0
	1500	0.07	0.05		
	1800			5.0	3.0
	3000	0.04	0.03		
	3600			3.0	2.0
	6000	0.03	0.02		
	7200			2.0	1.0
<p>Acoplamientos espaciadores y de membrana (disco)</p> <p>Valores métricos desplazamiento por eje espaciador de 100 mm.</p> <p>Valores de pulgada desplazamiento por eje por pulgada</p> 	600			3.0	1.8
	750	0.25	0.15		
	900			2.0	1.2
	1200			1.5	0.9
	1500	0.12	0.07		
	1800			1.0	0.6
	3000	0.07	0.04		
	3600			0.5	0.3
	6000	0.03	0.02		
	7200			0.3	0.2

Fuente: (PRÜFTECHNIK, 2017)

2.2.6. Causas de daños en máquinas rotatorias. Cerca del 50% o más, de todo daño prematuro en máquinas son causa de un alineamiento defectuoso. Este alto porcentaje parece excesivo a quienes consideran los sistemas de alineamiento convencionales como exitosos.

Daño en rodamientos y el desgaste de sellos tienen su inicio en alineamientos precarios, por lo cual se debe elegir un método moderno que garantice un buen alineamiento (BANNISTER, 2004).

2.2.7. Pata coja. Se le denomina así cuando la base de la máquina no es coincidente a la superficie a ser acoplada, los casos comunes son: pata coja paralela, pata coja angular, la “pata rugosa”, pata coja por fuerzas externas.

2.2.7.1. Pata coja paralela. Las bases o patas de la máquina y la superficie a ser acoplada son paralelas la cual hace que la corrección sea simple agregando o removiendo la cantidad correcta de laines.

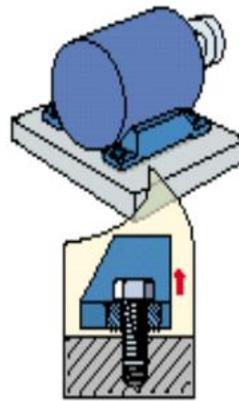


Figura 2-12. Pata coja paralela

Fuente: (BERNABÉ, 2017)

2.2.7.2. Pata coja angular. Es cuando las bases o patas de la máquina y la superficie a ser acoplada forman un ángulo, entonces se deben usar laines tipo cuña o escalonadas.

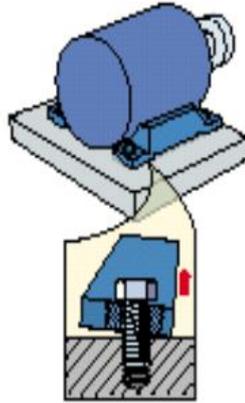


Figura 2-13. Pata coja angular

Fuente: (BERNABÉ, 2017)

2.2.7.3. *La “pata rugosa”*. Las superficies están dañadas o corroídas. Se evidencia por el movimiento del eje cuando se suelta un perno y luego no se puede insertar una lámina debajo de la pata.

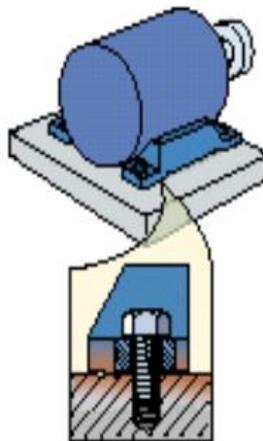


Figura 2-14. Pata rugosa

Fuente: (BERNABÉ, 2017)

2.2.7.4. *La pata coja puede ser causada por fuerzas externas*. Son los esfuerzos en las tuberías o los desalineamientos severos combinado con un acople (BERNABÉ, 2017).

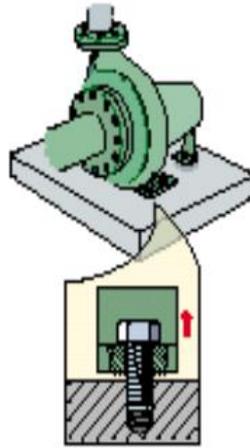


Figura 2-15. Pata coja por fuerzas externas

Fuente: (BERNABÉ, 2017)

2.2.8. Corrección con laines. Lo primero en corregir es la dirección vertical a menos que la dirección horizontal sea mucho mayor que la dirección vertical. No se recomienda usar más de tres o cuatro laines debajo de cada pata ya que un mayor número de laines actuarían como un resorte y la máquina rebotaría (BERNABÉ, 2017).



Figura 2-16. Laines

Fuente: (SKF, 2017)

2.2.9. Métodos de alineación. Existen diversos métodos para la alineación de máquinas tales como:

2.2.9.1. Regla y nivel. Es un método sencillo y rápido, pero poco confiable, debido a que se utiliza los sentidos como medio de referencia para la alineación.

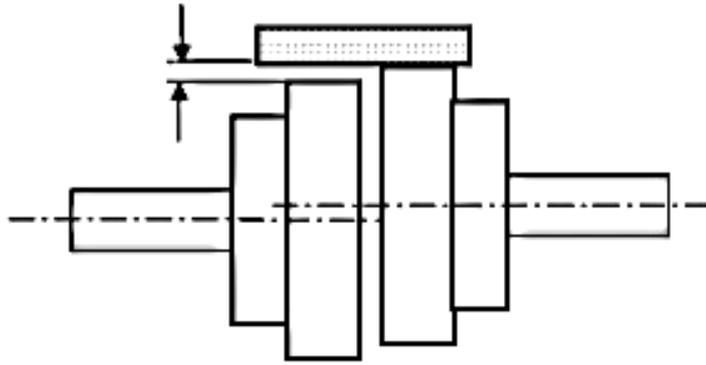


Figura 2-17. Relojes comparadores de carátula

Fuente: (NIÑO B, 1996)

2.2.9.2. *Relojes comparadores de carátula.* Más avanzado que la reglilla, su precisión cuando el sistema está nuevo puede llegar a $1/100\text{mm}$. Los cálculos para la corrección deben ser efectuados con una calculadora o en base a la experiencia y representa considerable tiempo para obtener un resultado bastante cuestionable (BANNISTER, 2004).

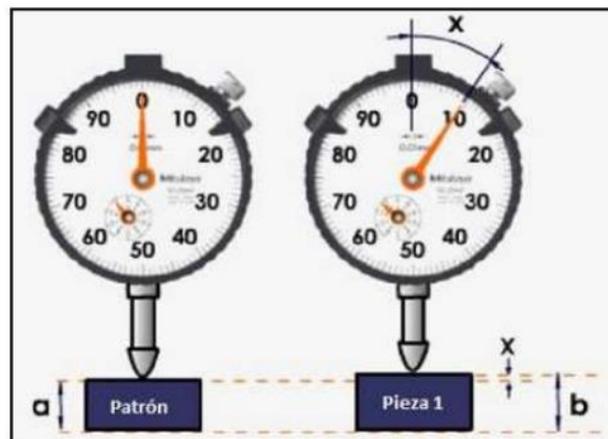


Figura 2-18. Alineación mediante relojes comparadores

Fuente: (COSTAS, 2017)

2.2.9.3. *Alineamiento láser.* El rayo láser se origina en el transductor. El rayo rebota en el reflector, el cual distingue entre desalineamiento paralelo y angular. El reflector dirige de retorno el rayo dentro del transductor, donde aterriza sobre un sistema de detección de posición. Estos componentes envían la medición de alineamiento actual al computador en términos de coordenadas del rayo. El transductor también mide y reporta el ángulo de rotación del eje asociado con cada ajuste de medición (BERNABÉ, 2017)

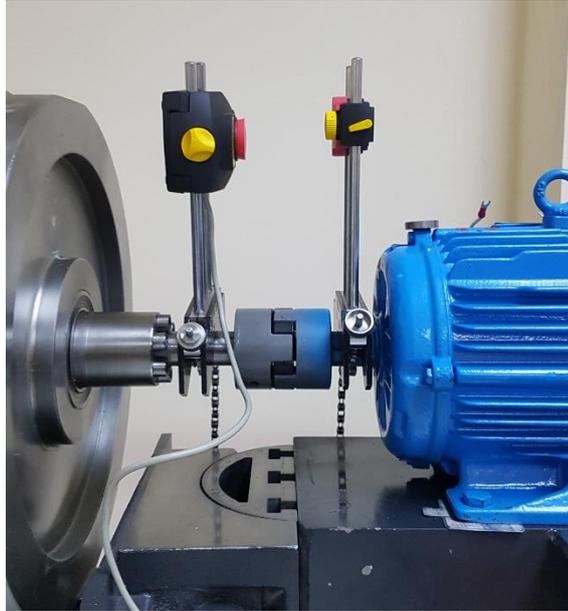


Figura 2-19. Alineador láser

Fuente: Autores

2.3. Sistema de gestión de energía

2.3.1. Definición de SGE según ISO 50001. “Conjunto de elementos de una organización, interrelacionados o que interactúan, para establecer una política y unos objetivos energéticos y los procesos y procedimientos necesarios para alcanzarlos” (NOVA, 2016).

2.3.2. Eficiencia energética. “Proporción u otra relación cuantitativa entre el resultado en términos de desempeño, de servicios, de bienes o de energía y la entrada de energía” (ISO50001:2011, 2017).

“La forma más rentable de reducir el consumo energético es el aumento de la eficiencia energética” (NOVA, 2016).

2.3.3. Eficiencia energética eléctrica (e3) “Se entiende por eficiencia energética eléctrica, la reducción de las potencias y energías demandadas al sistema eléctrico sin que afecte a las actividades normales realizadas en edificios, industrias o cualquier proceso de transformación” (SERRA, 2009).

Un estudio de ahorro y eficiencia energética comporta tres puntos básicos:

- Ayudar a la sostenibilidad del sistema y medio ambiente mediante la reducción de emisiones de CO₂ al reducir la demanda de energía
- Mejorar la gestión técnica de las instalaciones aumentando su rendimiento y evitando paradas de procesos y averías.
- Reducción, tanto del coste económico de la energía como del de explotación de las instalaciones (SERRA, 2009).

2.3.4. Conceptos básicos energéticos. Es importante conocer los siguientes:

2.3.4.1. Potencia Aparente(S). Es la multiplicación de la tensión por la corriente ($S = U I$) para sistemas monofásicos y ($S = 3 U I$, para sistemas trifásicos). Corresponde a la potencia que existiría si no hubiese desfasaje de la corriente, o sea, si la carga fuese formada por resistencias.

Entonces:

$$S = \frac{P}{\cos \varphi} \quad (1)$$

Donde:

S = Potencia aparente [VA]

P = Potencia activa [W]

cos φ = Factor de potencia

2.3.4.2. Potencia activa (P). Es la cantidad de potencia aparente que realiza trabajo

$$P = \sqrt{3} U I \cos \varphi \quad \text{ó} \quad P = S \cos \varphi \quad (2)$$

Donde:

P = Potencia [W]

U = Tensión [V]

I = Intensidad [I]

S = Potencia aparente [VA]

$\cos \varphi$ = Factor de potencia

2.3.4.3. *Potencia reactiva (Q)*. Es la cantidad de potencia aparente que “no” realiza trabajo

$$Q = \sqrt{3} UI \sin \varphi \quad \text{ó} \quad Q = S \sin \varphi \quad (3)$$

Donde:

Q= Potencia reactiva (VAr)

U = Tensión [V]

I = Intensidad [I]

S = Potencia aparente [VA]

φ = Angulo de fase [rad]

2.3.4.4. *Triángulo de potencias*. Para una mejor comprensión de los conceptos se tiene el siguiente triángulo de potencias.

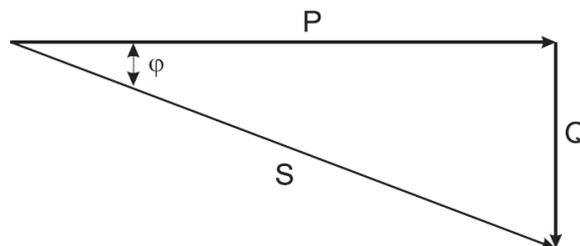


Figura 2-20. Triángulo de potencias
Fuente: (WEG, 2014)

2.3.4.5. *Factor de potencia*. Es la relación entre la potencia activa (P) y la potencia aparente (S) (WEG, 2014).

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad (4)$$

Donde:

$\cos \phi$ = Factor de potencia

S = Potencia aparente [VA]

P = Potencia activa [W]

Así,

- Carga Resistiva: $\cos \phi = 1$

- Carga Inductiva: $\cos \phi$ atrasado

- Carga Capacitiva: $\cos \phi$ adelantado

2.3.4.6. *Eficiencia en motores eléctricos.* Es la relación entre la potencia mecánica de salida y la potencia eléctrica de entrada. (BUN-CA, 2011).

$$\text{Eficiencia} = \frac{\text{Potencia mecánica de salida}}{\text{Potencia eléctrica que entra}} \quad (5)$$

$$\text{Eficiencia} = \frac{\text{Potencia eléctrica que entra} - \text{pérdidas}}{\text{Potencia eléctrica que entra}} \quad (6)$$

La eficiencia mayor es la unidad, pero las pérdidas de energía en los sistemas hacen que esta se reduzca, por eso los fabricantes utilizan materiales de mejor calidad para incrementar la eficiencia. (BUN-CA, 2011).

2.3.5. *Balance de energía.* El principio de conservación de la energía nos dice: la variación de la energía total del sistema durante un proceso es igual a la diferencia entre la energía total que entra y la energía total que sale. (CENGEL, 2011).

Es decir,

$$\left(\begin{array}{c} \text{Energía total que} \\ \text{entra al sistema} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{Energía total que} \\ \text{sale al sistema} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Cambio en la energía} \\ \text{total del sistema} \end{array} \right) \quad (7)$$

$$E_{\text{entrada}} - E_{\text{salida}} = \Delta E_{\text{sistema}} \quad (8)$$

Esta relación es más conocida como balance de energía y es aplicable a cualquier tipo de sistema que experimenta cualquier clase de proceso (CENGEL 2011)

2.3.6. Incremento de energía de un sistema, ΔE sistema. Para determinar el cambio de energía de un sistema durante un proceso se requiere evaluar la energía del sistema al principio y al final del proceso y encontrar su diferencia (CENGEL, 2011).

Es decir:

$$\text{Incremento de la energía} = \text{Energía en el estado final} - \text{Energía en el estado inicial} \quad (9)$$

$$\Delta E_{\text{sistema}} = E_{\text{final}} - E_{\text{inicial}} \quad (10)$$

2.4. Ministerio de Electricidad y Energía Renovable (MEER) y el Plan Nacional de Eficiencia Energética (PLANEE)

La Ley Orgánica del Servicio Público de la Energía Eléctrica establece que el Ministerio de Electricidad y Energías Renovables le corresponde la elaboración del Plan Nacional de Eficiencia Energética.

La Constitución de la República del Ecuador, publicada en el Registro Oficial 449 del 20 de octubre de 2008, en el artículo 413 establece que “El Estado promoverá la eficiencia energética, el desarrollo y uso de prácticas y tecnologías ambientalmente limpias y sanas, así como de energías renovables diversificadas, de bajo impacto, que no pongan en riesgo la soberanía alimentaria, el equilibrio ecológico de los ecosistemas y el derecho al agua”. Esto se refleja en el objetivo 7 del *Plan Nacional para el Buen Vivir 2013-2017* (PNBV), en las políticas y lineamientos estratégicos 7.7, 7.8 y 7.9, que señalan la necesidad de “Implementar tecnologías, infraestructuras y esquemas tarifarios para incentivar la eficiencia energética en los diferentes sectores de la economía”, así como “Promover patrones de consumo conscientes, sostenibles y eficientes con criterios de suficiencia dentro de los límites del planeta”.

El MEER es el órgano rector y planificador del Sector Eléctrico y le corresponde definir y aplicar las políticas; evaluar que la regulación y control se cumplan para estructurar un eficiente servicio público de energía eléctrica; identificar y dar seguimiento a la ejecución

de proyectos; otorgar títulos habilitantes, y evaluar la gestión del sector Eléctrico, la promoción y ejecución de planes y programas de energías renovables y los mecanismos para conseguir la eficiencia energética, de conformidad con lo dispuesto en la Constitución y la Ley. Además de la elaboración del PLANEE.

La Cartera de Estado presenta el PLANEE como un instrumento de política pública que busca mejorar los hábitos de consumo energético, mediante la incorporación de la eficiencia energética en los sectores relacionados con la provisión y uso de la energía.

Con la implementación del PLANEE, el Ecuador cumplirá iniciativas internacionales orientadas a “garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna”, meta establecida por las Naciones Unidas en el séptimo Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS-7) y “duplicar el índice global de la mejora en eficiencia energética”, objetivo esencial de la iniciativa *Energía Sostenible para Todos* (SE4ALL).

2.4.1. Situación del sector Energético en el Ecuador. Los principales sectores de consumo identificados fueron: sector Transporte, correspondiente a 42% del total del consumo energético nacional; sector Industrial (18%) y sector Residencial (12%), sector Comercial (5,68%), Agropesca y Minería (0,94%), Construcción y otros (16,47%). Finalmente, el autoconsumo (consumo propio) del sector energético representó 5% (MINISTERIO DE ELECTRICIDAD Y ENERGÍAS RENOVABLES, 2016).

2.4.2. Eje industria. El sector Industrial alberga un interesante potencial de ahorro, sobre todo, en el caso de un comportamiento alternativo de la economía, según el que se prevé el ingreso de industria pesada de alta intensidad energética. La reducción se produce principalmente por la renovación de equipos industriales y la introducción de la norma ISO 50001 en los procesos de mayor consumo (MINISTERIO DE ELECTRICIDAD Y ENERGÍAS RENOVABLES, 2016).

Tabla 2-2. Objetivos específicos, líneas de acción e indicadores en el Eje Industrial

EJE INDUSTRIAL		
Objetivo sectorial:	Reducir el consumo de energía por unidad de producción física en los subsectores de la industria.	
Indicador:	Consumo energético en cada subsector industrial indexado a las unidades de producción física para las industrias que implementan medidas de eficiencia energética.	
Meta:	Al 2035, se registra un ahorro de por lo menos 29,9 Mbep, gracias a las acciones de eficiencia energética implementadas en el sector.	
Objetivo específico	Línea de acción	Estimación de la reducción de consumo energético
Reemplazar equipos ineficientes, aplicar sistemas de cogeneración y adoptar la norma ISO 50001 en las industrias energo-intensivas	Programa para la implementación de la norma ISO 50001 en las industrias energo-intensivas	Reducción de 7,4 Mbep, de 2007 a 2035. Reducción de intensidad energética considerando 100 industrias energo-intensivas.
	Programa de cogeneración en la industria.	Reducción de 7,75 Mbep, de 2007 a 2035. Mejora de la eficiencia energética en 10%.
	Programa de recambio de motores, bombas, calderas y calentadores en las industrias.	Reducción de 14,7 Mbep, de 2007 a 2035. Reducción estimada de 10% de la intensidad energética, al 2035.
Impulsar el desarrollo de un mercado de Empresas de Servicios Energéticos (ESCOs) en el país	Programa para el desarrollo y promoción de un mercado de ESCOs en Ecuador.	No cuantificable.

Fuente: (MINISTERIO DE ELECTRICIDAD Y ENERGÍAS RENOVABLES, 2016)

2.5. Estudio de vibraciones

2.5.1. Vibración. Es la variación de una magnitud provocada en el tiempo, la cual describe movimiento y/o la posición de un sistema, si la magnitud es mayor o menor que un valor medio tomado como referencia (POLOMINO MARIN, 2007).

2.5.2. Medición de la amplitud de vibración. Las definiciones siguientes son de aplicación a la medición de la amplitud de las vibraciones mecánicas.

Amplitud Pico (Pk): Distancia máxima de la onda desde el punto cero o de equilibrio.

Amplitud Pico a Pico (Pk-Pk): Distancia desde una cresta negativa hasta una cresta positiva. En una función senoidal el valor pico a pico es dos veces el valor pico, por simetría. En otras ondas de vibración este valor cambia.

Amplitud Raíz del Promedio de los Cuadrados (RPC). En una función senoidal el valor RPC equivale a 0.707 del valor pico, el valor de RPC es directamente proporcional al área bajo la curva. El valor RPC debe ser utilizado en los cálculos de fuerza y/o energía en forma de onda (WHITE, 2010).

2.5.3. Frecuencia natural. Todo sistema máquina-soporte se caracteriza por tener una frecuencia que solo depende de la masa y la rigidez del mismo, es importante este concepto porque a partir de la frecuencia natural se inicia el diagnóstico de fallas en una máquina (POLOMINO MARIN, 2007).

Ecuación de un sistema resorte masa no amortiguada:

$$F_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (11)$$

Donde:

F_n = Frecuencia natural [Hz]

k = rigidez [N/m]

m = masa [kg]

2.5.4. Resonancia. Ocurre cuando en una máquina existen fuerzas excitadoras que varían con el tiempo, pueden ser causados por modos de falla como el desequilibrio, desalineación, etc. y cuya frecuencia de repetición es cercana a alguna de las primeras frecuencias naturales de la máquina (SÁNCHEZ MARÍN, y otros, 2007).

2.5.5. Transductores de vibración. Los transductores de vibración son aquellos dispositivos que convierten las vibraciones mecánicas en señales eléctricas en el cual se acondicionan y procesan con una amplia variedad de instrumentos, los cuales proveen la información necesaria para verificar el desempeño, diagnóstico fallas e identificar parámetros. Los tipos de transductores se puede observar en la siguiente tabla (ESHLEMAN, 2002).

Tabla 2-3. Transductores de vibración

Nombre:	Sensible a
Sensor de proximidad	Desplazamiento
Sensor de velocidad	Velocidad
Acelerómetro	Aceleración

Fuente: (WHITE, 2010)

2.5.6. Acelerómetro. Dispositivo utilizado para medir vibraciones.

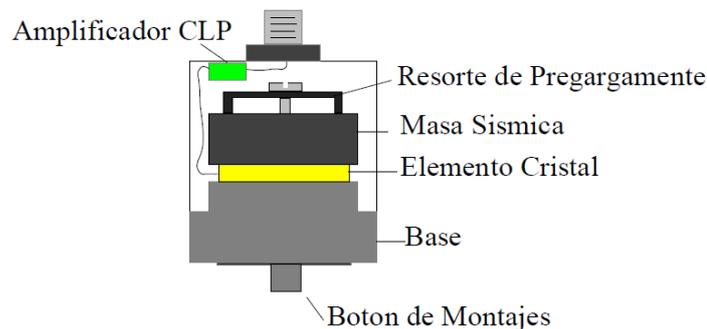


Figura 2-21. Acelerómetro piezoeléctrico

Fuente: (WHITE, 2010)

2.5.6.1. Acelerómetro piezoeléctrico. El primer acelerómetro en ser diseñado es el de tipo de compresión mostrado en la figura, el preferido y más usado es acelerómetro de tipo cizallamiento debido que el elemento a estudiar esa sometido a fuerzas de cizallamiento (WHITE, 2010).

2.5.7. Ubicación de los puntos de prueba. Lo más adecuado es ubicar en un metal sólido entre el rodamiento y el sensor el transductor de prueba lo más cercano posible del rodamiento, (WHITE, 2010).

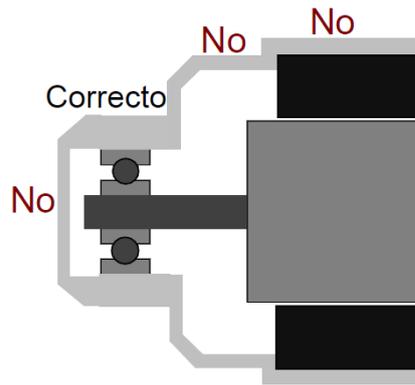


Figura 2-22. Ubicación del acelerómetro
Fuente: (WHITE, 2010)

2.5.8. Análisis de espectros. Es la transformación de una señal de la representación en el dominio del tiempo hacia la representación en el dominio de la frecuencia (INGENIERIA, 2010).

2.5.8.1. La transformada de Fourier. El matemático Jean Baptiste Fourier (1768-1830) quien encontró la forma de representar una señal compleja en el dominio del tiempo por medio de series de curvas senoidales con valores de amplitud y frecuencia específicos. Un analizador de espectros trabaja con la transformada rápida de Fourier es capturar una señal de una máquina, calcular todas las series de señales senoidales que contiene la señal compleja y mostrarlas de forma individual en una gráfica de espectros (INGENIERIA, 2010).

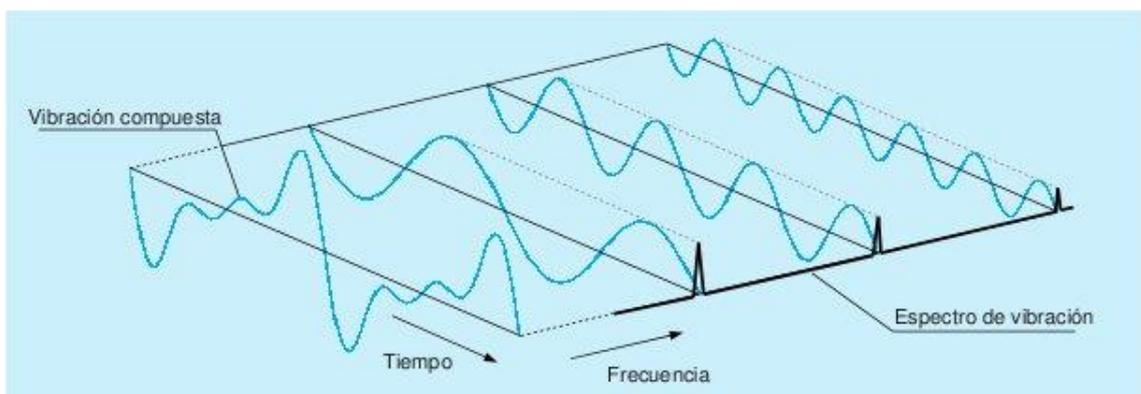


Figura 2-23. Procesado FFT de una onda vibratoria compleja.
Fuente: (INGENIERIA, 2010)

CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA

La siguiente investigación se desarrolló con acoples rígido y flexible. La ecuación se obtuvo mediante regresión lineal y el software Microsoft Excel. Para el contraste de hipótesis se utilizó la correlación de Pearson.

3.1. Características del módulo de desalineación

El módulo de desalineación está constituido por elementos indispensables para el estudio del consumo energético tales como un motor trifásico asíncrono jaula de ardilla de 3,7 kW de potencia, un generador bifásico de corriente alterna de 12,5 kW, mesa de fundición dúctil nodular el cual absorbe vibraciones haciéndolo más rígido al sistema, una mesa de precisión milimétrica para proporcionar distintos niveles de desalineación paralela y angular. En el Anexo B denominado Fichas técnicas del módulo de desalineación nos indica las características técnicas de los principales equipos utilizados para la experimentación.

1. Enchufe
2. Tubo cuadrado de 4 pulgadas
3. Plancha de acero galvanizado de 4mm
4. Soporte generador
5. Tablero eléctrico
6. Generador bifásico ca
7. Acople flexible/rígido
8. Carros transversal y angular
9. Motor asíncrono trifásico jaula de ardilla 3,7 kW
- 10 Soporte motor eléctrico
11. Fundición
12. Para de emergencia
13. Caja de control
14. Variador de frecuencia 3,7kW

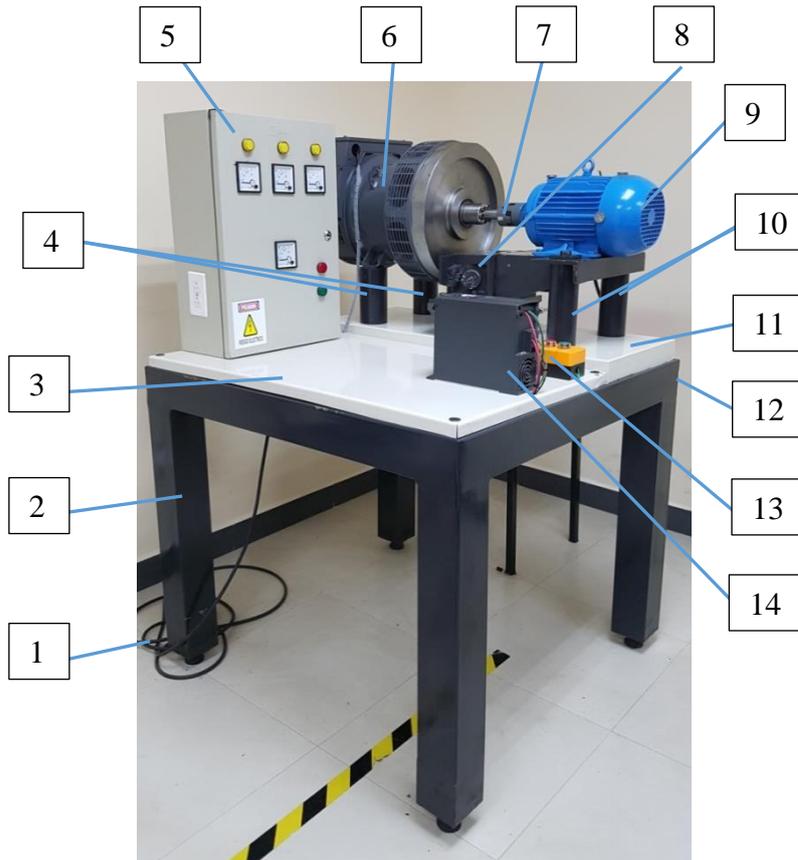


Figura 3-1. Partes módulo de desalineación
Fuente: Autores

3.2. Pruebas de funcionamiento del módulo de desalineación

3.3.1. Carga suministrada. La potencia nominal del motor eléctrico trifásico fue de 3700 W. Las mediciones de potencia activa total media realizadas con el analizador de la calidad de la energía Fluke 435 II en las entradas de las fases del motor arrojó un valor 3021,72W.

Lo que nos indica que el motor eléctrico utilizado para la experimentación trabajó con el 81,67% de la carga nominal.

3.3.2. Pruebas de funcionamiento de la instalación eléctrica. La instalación eléctrica es fundamental. Para ello se comprobó el calibre del conductor que ha sido instalado.

El motor eléctrico trifásico asíncrono jaula de ardilla fue de 5HP, por lo tanto según el Anexo C nos indica el amperaje a plena carga, para nuestro caso se seleccionó 15,9 Amperios a 220V.

Para calcular el calibre del conductor, se toma el 125% de la corriente seleccionada anteriormente (ENRÍQUEZ HARPER, 2017).

Entonces:

$$I_{real} = I_{nominal} * 125\% \quad (12)$$

$$I_{real} = 15.9A * 1.25 = 19.88 A$$

En el Anexo D indica que para 19.88 A se requiere calibre de conductor número 12 AWG.

El calibre de conductor que posee la instalación eléctrica de fuerza es 12 AWG. Para lo cual se comprobó que el calibre de conductor que posee la instalación eléctrica es el correcto, según los cálculos realizados.

También se realizó una inspección eléctrica mediante termografía de la variación de temperatura en las instalaciones eléctricas, en la cual sugiere acciones basadas en el aumento de temperatura según NETA MTS:2007

Mediciones de temperatura inicial de las instalaciones eléctricas. Las termografías realizadas inicialmente nos indicaron que la variación de un rango de 18,2°C – 40,2°C de variación de temperatura entre los elementos de la instalación eléctrica y la temperatura ambiente. Lo que nos indica que se debe ordenar una investigación ante una posible falla. (MTS, 2011).

Temperatura inicial del interruptor principal: Se tomó las mediciones de termografía en los seis puntos de contacto.

Tabla 3-1. Valores de temperatura inicial del interruptor principal

Ubicación	Temperatura máxima °C	Temperatura ambiente °C	Variación de Temperatura °C
E11	46,5	23,5	23
E12	47,2	23,5	23,7
E13	47,2	23,5	23,7
E14	57,1	23,5	33,6
E15	63,7	23,5	40,2
E16	61,4	23,5	37,9

Fuente: Autores

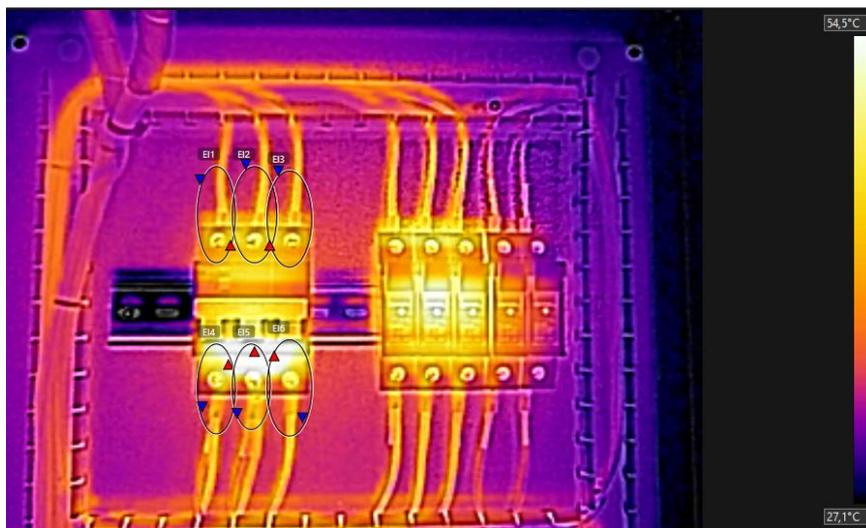


Figura 3-2. Termograma condición inicial interruptor principal

Fuente: Autores

Temperatura inicial del interruptor secundario: Se tomó las mediciones de termografía en los seis puntos de contacto.

Tabla 3-2. Valores de temperatura inicial del interruptor secundario

Ubicación	Temperatura máxima °C	Temperatura ambiente °C	Variación de temperatura °C
E11	44	23,5	20,5
E12	44,9	23,5	21,4
E13	44,9	23,5	21,4
E14	41,7	23,5	18,2
E15	43,5	23,5	20
E16	43,4	23,5	19,9

Fuente: Autores

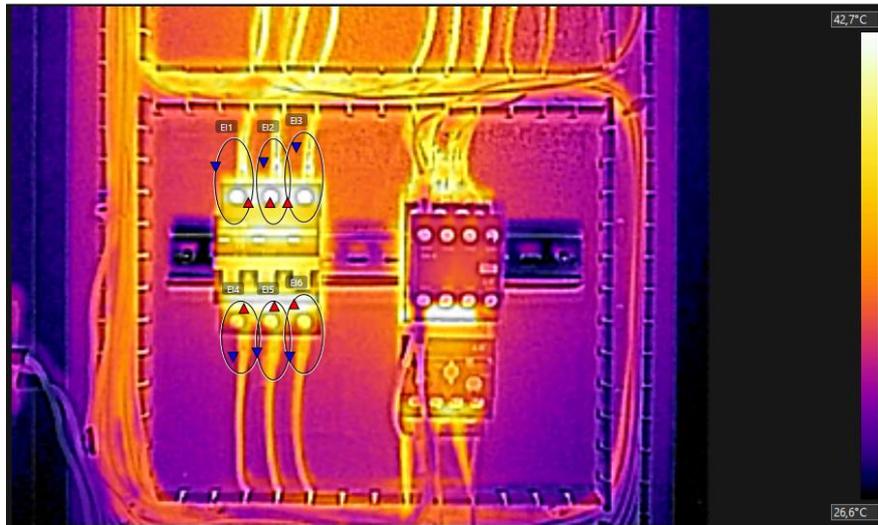


Figura 3-3. Termograma condición inicial interruptor secundario
Fuente: Autores

Mediciones de temperatura posterior a la actividad mantenimiento realizada en las instalaciones eléctricas. La actividad que se realizó en las instalaciones eléctricas es el reajuste de las terminales conectadas a los dispositivos eléctricos. Resultando las mediciones de las termografías realizadas en un rango de 4°C – 5,2°C de variación de temperatura entre los elementos de la instalación eléctrica y la temperatura ambiente. Reduciendo en 38,5°C de la temperatura máxima respecto a la condición inicial, mejorando las condiciones iniciales de temperatura. (MTS, 2011).

Temperatura del interruptor principal: Se tomó las mediciones de termografía en los seis puntos de contacto.

Tabla 3-3. Valores de temperatura del interruptor principal

Ubicación	Temperatura máxima °C	Temperatura ambiente °C	Variación de Temperatura °C
E11	27,9	23,7	4,2
E12	28,2	23,7	4,5
E13	27,9	23,7	4,2
E14	28,6	23,7	4,9
E15	30,1	23,7	6,4
E16	28,8	23,7	5,1

Fuente: Autores



Figura 3-4. Termograma condición final interruptor principal

Fuente: Autores

Temperatura del interruptor secundario: Se tomó las mediciones de termografía en los seis puntos de contacto.

Tabla 3-4. Valores de temperatura del interruptor secundario

Ubicación	Temperatura máxima °C	Temperatura ambiente °C	Variación de temperatura °C
E11	28,6	23,7	4,9
E12	28,9	23,7	5,2
E13	29,3	23,7	5,6
E14	28,9	23,7	5,2
E15	29,5	23,7	5,8
E16	30	23,7	6,3

Fuente: Autores



Figura 3-5. Termograma condición final interruptor secundario

Fuente: Autores

3.3.3. Frecuencia natural de la estructura del módulo de desalineación. Se recomienda ver el Anexo E el mismo nos indica los pasos realizados para nuestra experimentación en el cual se utilizó el software MAINTraq Viewer 3.1 para medir la frecuencia natural del módulo de desalineación.

1. Abrir el software MAINTraq Viewer 3.1, clic en Ensayo, luego seleccionar en Nuevo.
2. Dar clic en APOYOS
3. Crear los puntos dando en clic en Nuevo según apoyos se hayan creado
4. Seleccionar en FORMAS DE ONDA y clic en Nueva, asegúrese que una de ellas sea de velocidad.
5. Definir las variables
6. Conectar el acelerómetro al equipo Vibracheck AGB200.
7. Colocar en la zona a medir la frecuencia natural.
8. Encender el equipo Vibracheck y se escoge la opción REGISTRAR, luego ENTER en MAINTRAQ VIEWER.
9. Seleccionar en Medir, en el cual se medirá las vibraciones en tiempo real.
10. Golpear en una zona cercana al punto donde se colocó el acelerómetro.
11. Analizar el espectro medido.

3.2.3.1. Frecuencias naturales medidas en el módulo de desalineación. Se midió en las direcciones radiales verticales y axiales del motor eléctrico y generador bifásico.

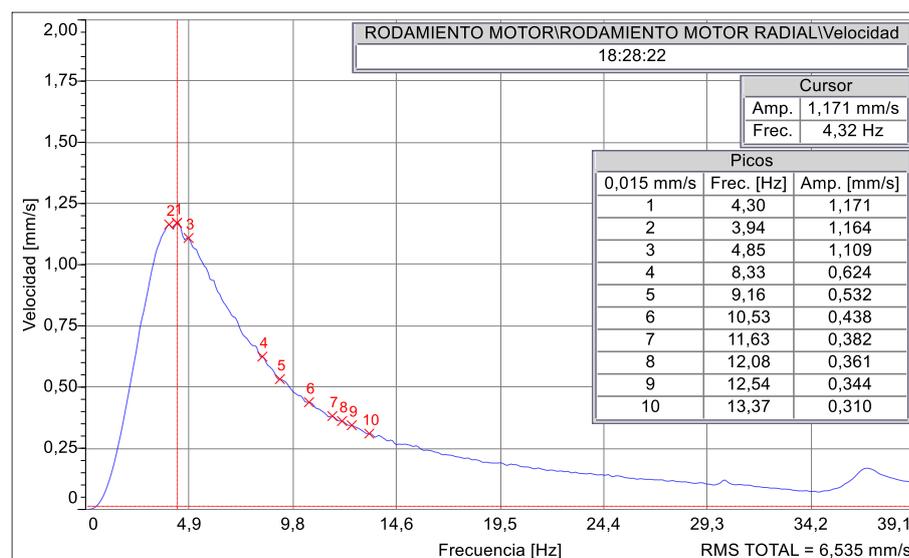


Figura 3-6. Frecuencia natural de LGV

Fuente: Autores

La frecuencia natural en el lado generador vertical (LGV) fue de 4,32 Hz, se observó que no existe picos altos alrededor de los 30 Hz.

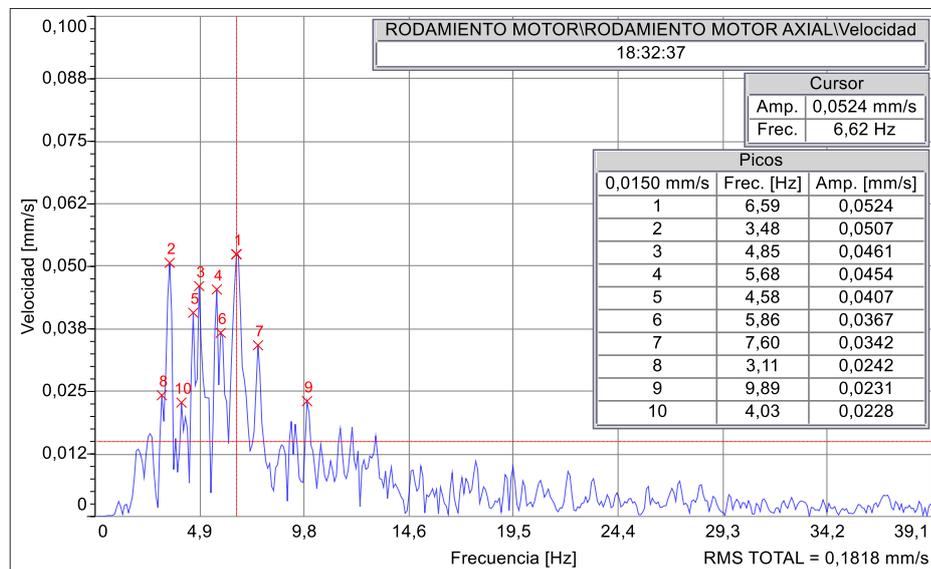


Figura 3-7. Frecuencia natural de LGA

Fuente: Autores

La frecuencia natural en el lado generador axial (LGA) fue de 6,62 Hz, se observó que no existe picos altos alrededor de los 30 Hz.

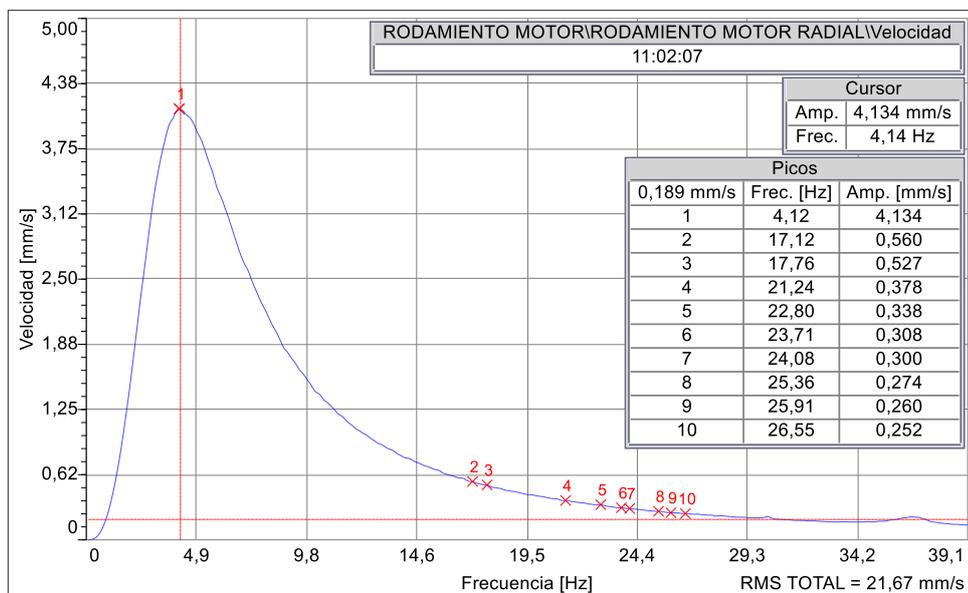


Figura 3-8. Frecuencia natural de LMV

Fuente: Autores

La frecuencia natural en el lado motor vertical (LMV) fue de 4,14 Hz, se observó que no existe picos altos alrededor de los 30 Hz.

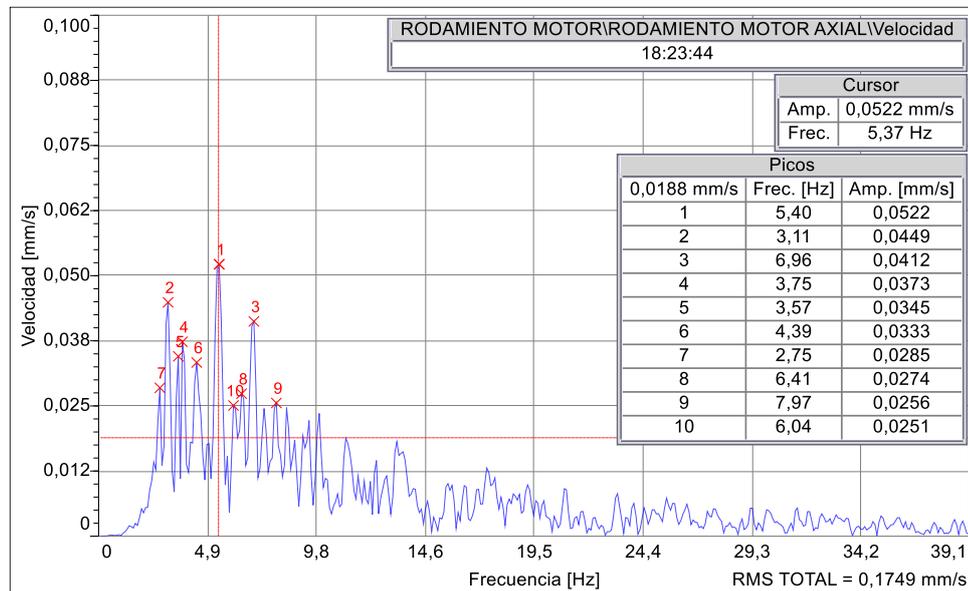


Figura 3-9. Frecuencia natural de LMA

Fuente: Autores

La frecuencia natural en el lado motor vertical (LMA) fue de 5,37 Hz, se observó que no existe picos altos alrededor de los 30 Hz.

Según el espectro de velocidad la frecuencia natural medida en distintas direcciones del módulo de desalineación nos indica lo siguiente:

Tabla 3-5. Frecuencias naturales medidas en el módulo de desalineación

Punto	Frecuencia (Hz)	RMS TOTAL (mm/s)
Lado generador radial	4,32	6,535
Lado generador axial	6,62	0,1818
Lado motor radial	4,14	21,67
Lado motor axial	5,37	0,1749

Fuente: Autores

La frecuencia natural del módulo de desalineación se encuentra entre 4.32 y 6.62 Hz siendo menor a las frecuencias de excitación del conjunto motor-generator (30 Hz). Por lo tanto, el módulo no trabajó con resonancia.

3.3. Funcionamiento del módulo de desalineación

3.4.1. *Proceso de puesta en marcha y desconexión.* Se recomienda ver el Anexo F, en el cual se representa un esquema de los circuitos de mando y potencia del proceso de puesta en marcha descrito en el siguiente párrafo.

Se conectó el enchufe del módulo de desalineación a una toma de corriente de 220Vca trifásica, se comprobó que el paro de emergencia (S0) se encontraba en posición normalmente cerrado, se posicionó en “on” los interruptores termo magnéticos (S1 y S2) ubicados en el tablero eléctrico, se accionó el motor eléctrico por medio del pulsador normalmente abierto (P1, color verde) ubicado en la caja de control. Para la desconexión del módulo de desalineación se presionó el pulsador normalmente cerrado (P0, color rojo). El botón paro de emergencia (S0) se acciona en caso de ser necesario.

3.4.2. *Proceso de alineación con alineador láser OPTALING PLUS.* Se debe tener cuenta entre la máquina fija y móvil, en este caso la máquina fija es el generador bifásico de corriente alterna, y la máquina móvil es el motor eléctrico. El Anexo G el mismo nos indica los pasos realizados para nuestra experimentación.

1. Insertar los postes en el soporte.
2. Asegurar los postes en su sitio apretando los pernos con cabeza socket hexagonal en los lados de los soportes.
3. Poner los soportes en el eje o acople, coloque el pin roscado en el agujero de uno de los extremos del soporte y pase la cadena alrededor del eje hasta el otro extremo del soporte.
4. Poner el extremo de la cadena suelta en la clavija de anclaje, luego girar la perilla para asegurar la cadena-soporte al eje.
5. Asegurar los lados sueltos de la cadena en sí misma. Ahora el soporte estará fijo sobre el eje. No empuje o tire el soporte para chequear, ya que esto solo aflojará el montaje que ya hizo.
6. Asegurar las perillas amarillas del transductor y reflector estén lo suficientemente sueltas para deslizarse sobre los postes. Recuerde que el transductor se coloca en eje estático y el reflector en el eje móvil.

7. Asegurar las perillas amarillas para fijar los componentes a los postes, luego quite la tapa del láser.
8. Encender el alineador láser en la cual la pantalla dimensiones aparecerá por defecto.
9. Presionar la tecla DIM para introducir las dimensiones
10. Presionar la tecla M y gire las perillas para obtener una medida de cero, luego gire los acoples para obtener las medidas para alineación.
11. Presionar la tecla mediciones paralela-angular para conocer las medidas de alineación.

3.4. Método para las mediciones

3.4.1. *Proceso configuración de MAINTraQ Predictive 2.1* Se recomienda ver el Anexo H, el mismo nos indica los pasos del proceso de configuración de MAINTraQ Predictive 2.1 realizados para nuestra experimentación.

1. Dar clic izquierdo en archivo y luego clic en configurar la base de datos
2. Crear una nueva carpeta dando clic en archivo, luego en nueva carpeta raíz y luego poner el nombre del equipo.
3. Crear una nueva máquina dando clic derecho sobre la carpeta creada y luego clic en Máquina, llenar los campos con la información requerida para el análisis.
4. Dar clic derecho sobre una máquina, se escoge la opción nuevo punto y luego seleccionar la opción De Vibraciones.
5. Llenar los campos requeridos según el análisis a realizar.
6. Dar clic derecho sobre cada uno de los puntos y se selecciona Nuevo a continuación clic en Espectro.
7. Dar clic derecho sobre cada uno de los puntos y se selecciona Nuevo a continuación clic en Forma de onda.

3.4.2. *Transferencia de datos al equipo VIBRACHECK ABG200.* Se recomienda ver el Anexo I, el cual indica los pasos para la transferencia de datos al equipo Vibracheck ABG200.

1. Encender el equipo VIBRACHECK ABG200 y seleccionar la opción COMUNICAR
2. Conectar el cable USB entre el equipo VIBRACHECK ABG200 y el computador.
3. Ingresar a la ventana Envío de datos

4. Escoger la opción Máquinas, se selecciona las máquinas que se desee tomar medidas con el botón >.
5. Dar clic en el botón Enviar al Colector de datos.

3.4.3. *Recopilación de datos en desalineación paralela.* Se recomienda ver el Anexo J, el cual indica los pasos para la recopilación de datos en desalineación paralela.

1. Desenergizar el módulo.
2. Alinear el módulo.
3. Conectar el acelerómetro al equipo VIBRACHECK ABG200, de preferencia al canal uno.
4. Encender VIBRACHECK ABG200.
5. Seleccionar la opción RUTAS del MENU.
6. Seleccionar la ruta FUERA DE RUTA y presionar ENTER.
7. Comenzar las mediciones por el punto LMA si el acople es flexible, si el acople es rígido no se medirá.
8. Presionar el pulsador normalmente abierto (P1, color verde).
9. Conectar las cargas óhmicas estén conectadas y comprobar que estén funcionando durante la medición
10. Comprobar que la velocidad del eje del motor sea aproximadamente 1710 RPM.
11. Presionar ENTER en el equipo VIBRACHECK ABG 200 para comenzar a medir las vibraciones en ese punto.
12. Repetir los pasos 7 al 11 pero con los diferentes puntos, LMV, LMH, LGV, LGA, LGH.
13. Medir la potencia de salida en el generador.

3.4.4. *Recopilación de datos en desalineación angular.* Es el mismo procedimiento que la desalineación paralela, se debe tomar en cuenta lo siguiente:

- Condición antes de desalinear

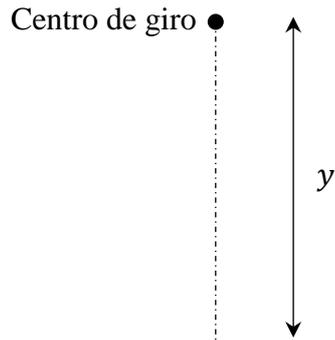


Figura 3-10. Condición antes de desalinear el módulo de desalineación
Fuente: Autores.

- Condición después de desalinear

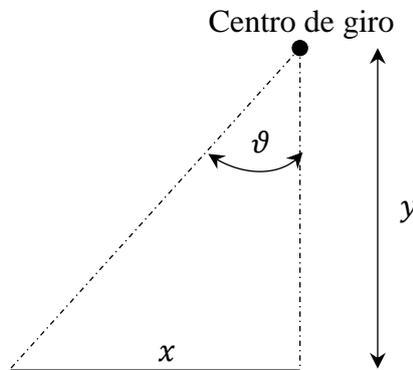


Figura 3-11. Valor de desalineación proporcional o global
Fuente: Autores

$$x = y \operatorname{sen}(\vartheta) \quad (13)$$

Donde:

x = Distancia del nivel de desalineación proporcional o global.

y = Distancia desde el centro de giro (arbitrario), punto donde se colocará el reloj palpador.

ϑ = Ángulo de desalineación.

Si la desalineación es angular y con acoplamiento rígido se sigue la Tabla 3-13 utilizando la manija de desplazamiento angular. Para la siguiente investigación

$$y = 140 \text{ mm}, \vartheta = 0,491^\circ.$$

Tabla 3-6. Distancia del nivel de desalineación proporcional o global.

Ítem	Ángulo en grados	Ángulo en radianes	Ángulo en miliradianes	x(mm)
1	0	0,000	0,00	0,00
2	0,049	0,001	0,86	0,12
3	0,098	0,002	1,71	0,24
4	0,147	0,003	2,57	0,36
5	0,196	0,003	3,42	0,48
6	0,246	0,004	4,29	0,60
7	0,295	0,005	5,15	0,72
8	0,345	0,006	6,02	0,84
9	0,392	0,007	6,84	0,96
10	0,442	0,008	7,71	1,08
11	0,491	0,009	8,57	1,20

Fuente: Autores

Si la desalineación es angular y con acoplamiento flexible se sigue la Tabla 3-14 utilizando la manija de desplazamiento angular, Para la siguiente investigación se analizó con los valores de $y = 140 \text{ mm}$, $\vartheta = 1^\circ$.

Tabla 3-7. Distancia del nivel de desalineación proporcional o global.

Ítem	Ángulo en grados	Ángulo en radianes	Ángulo en miliradianes	x(mm)
1	0	0,000	0,00	0,00
2	0,1	0,002	1,75	0,24
3	0,2	0,003	3,49	0,49
4	0,3	0,005	5,24	0,73
5	0,4	0,007	6,98	0,98
6	0,5	0,009	8,73	1,22
7	0,6	0,010	10,47	1,47
8	0,7	0,012	12,22	1,71
9	0,8	0,014	13,96	1,95
10	0,9	0,016	15,71	2,20
11	1	0,017	17,45	2,44

Fuente: Autores

3.4.5. Descarga de mediciones al software MAINTraq Predictive 2.1. Se recomienda ver el Anexo K, el cual indica los pasos para la descarga de mediciones al software MAINTraq Predictive 2.1

1. Conectar VIBRACHECK ABG200 a la computadora mediante el cable USB.
2. Encender el equipo VIBRACHECK ABG200 y seleccionar la opción COMUNICAR.
3. Abrir el software MAINTraq Predictive 2.1 y seleccionar en recibir datos.
4. Dar clic en Desde Colector de Datos.
5. Esperar hasta que todos los datos se hayan descargado.

3.4.6. Recopilación de datos del analizador de la energía Fluke 435 II. Se recomienda ver el Anexo L, el cual indica los pasos para la recopilación de datos del analizador de la calidad de la energía Fluke 435 II.

1. Colocar al analizador de calidad de energía en una superficie plana para su manipulación
2. Escoger el tipo de pinzas amperimétricas Fluke i400s debido a que vamos a manejar intensidades mayores a 5A.
3. Colocar las tres pinzas amperimétricas en las entradas de las fases del motor eléctrico trifásico jaula de ardilla.
4. Conectar los lagartos del analizador de calidad de energía a los terminales del motor eléctrico identificando cada fase con su respectivo color.
5. Encender el equipo y seleccionar Setup.
6. Escoger Setup Wizard 1/6 y elegir de la serie de opciones de conexiones.
7. Elegir la frecuencia nominal de trabajo y presionar NEXT.
8. Elegir el voltaje nominal de trabajo y presionar NEXT.
9. Elegir la norma a la cual se registrará el análisis y presionar NEXT.
10. Configurar los parámetros técnicos de la pinza amperimétrica seleccionada y presionar NEXT.
11. Elegir la escala de voltaje en el neutro y en cada una de las fases de trabajo y presionar NEXT.
12. Seleccionar del menú la opción potencia y energía
13. Guardar los datos obtenidos y seleccionar en Stop y culminará la medición con un código para su posterior análisis.

3.4.7. Descarga de datos del analizador de la calidad de energía Fluke 435 II. Se recomienda ver el Anexo M, el cual indica los pasos para la descarga de datos del analizador de la calidad de la energía Fluke 435 II.

1. Instalar en el pc el software Power Log 430 II versión 4.5.
2. Extraer la tarjeta de memoria del analizador de calidad energía Fluke 435 II.
3. Copiar la carpeta “FLUKE” de la tarjeta de memoria a nuestro pc.
4. Arrastrar la carpeta “FLUKE” al programa Power Log 430 II desplegando una ventana con múltiples opciones.
5. Escoger el código de la medida a descargar.
6. Descargar la medida seleccionada.
7. Seleccionar de la barra de menús “fichero” y posteriormente de la lista de opciones “Exportar datos”.
8. Seleccionar las variables que estarán sujetas a análisis y se da clic en guardar como.
9. Seleccionar una carpeta en la cual vayamos a almacenar cada una de nuestras medidas y damos clic en guardar.

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Para el cálculo del coeficiente de correlación de Pearson se utilizó la siguiente fórmula:

$$r = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{n(\sum x^2) - (\sum x)^2} \sqrt{n(\sum y^2) - (\sum y)^2}} \quad (14)$$

Donde:

n = Representa el número de pares de datos presentes.

$\sum y$ = Denota la suma de todos los valores de y .

$\sum x$ = Denota la suma de todos los valores de x .

$\sum x^2$ = Indica que cada valor de x debe elevarse al cuadrado y después deben sumarse esos cuadrados.

$(\sum x)^2$ = Indica que los valores de x deben sumarse y el total elevarse al cuadrado.

Es sumamente importante evitar confundirse entre $\sum x^2$ y $(\sum x)^2$

$\sum xy$ = Indica que cada valor de x debe multiplicarse primero por su valor y correspondiente. Después de obtener todos estos productos, se calcula su suma.

r = Representa el coeficiente de correlación lineal de una muestra.

Para el cálculo de los coeficientes a y b de la ecuación ajustada se determinó por las siguientes ecuaciones

$$y = ax + b \quad (15)$$

Donde:

y = Ecuación de la recta pendiente y ordenada en el origen

a = pendiente

x = Variable independiente

b = Ordenada en el origen

$$a = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad (16)$$

Donde:

a = Pendiente

n = Representa el número de pares de datos presentes.

$\sum xy$ = Indica que cada valor de x debe multiplicarse primero por su valor y correspondiente. Después de obtener todos estos productos, se calcula su suma.

$\sum y$ = Denota la suma de todos los valores de y .

$\sum x$ = Denota la suma de todos los valores de x .

$\sum x^2$ = Indica que cada valor de x debe elevarse al cuadrado y después deben sumarse esos cuadrados.

$(\sum x)^2$ = Indica que los valores de x deben sumarse y el total elevarse al cuadrado.

Es sumamente importante evitar confundirse entre $\sum x^2$ y $(\sum x)^2$.

$$b = \frac{\sum y - a \sum x}{n} \quad (17)$$

Donde:

b = Ordenada en el origen

$\sum y$ = Denota la suma de todos los valores de y .

$\sum x$ = Denota la suma de todos los valores de x .

a = Pendiente

n = Representa el número de pares de datos presentes.

4.1. Resultados con acople rígido de desalineación y vibración

Se realizó cinco repeticiones, cada repetición tuvo once niveles de desalineación (tratamientos), luego se calculó la media de cada nivel de desalineación, luego se validó con el estadístico r de Pearson.

4.1.1. Desalineación paralela vs vibración LGV. Se presenta los siguientes resultados.

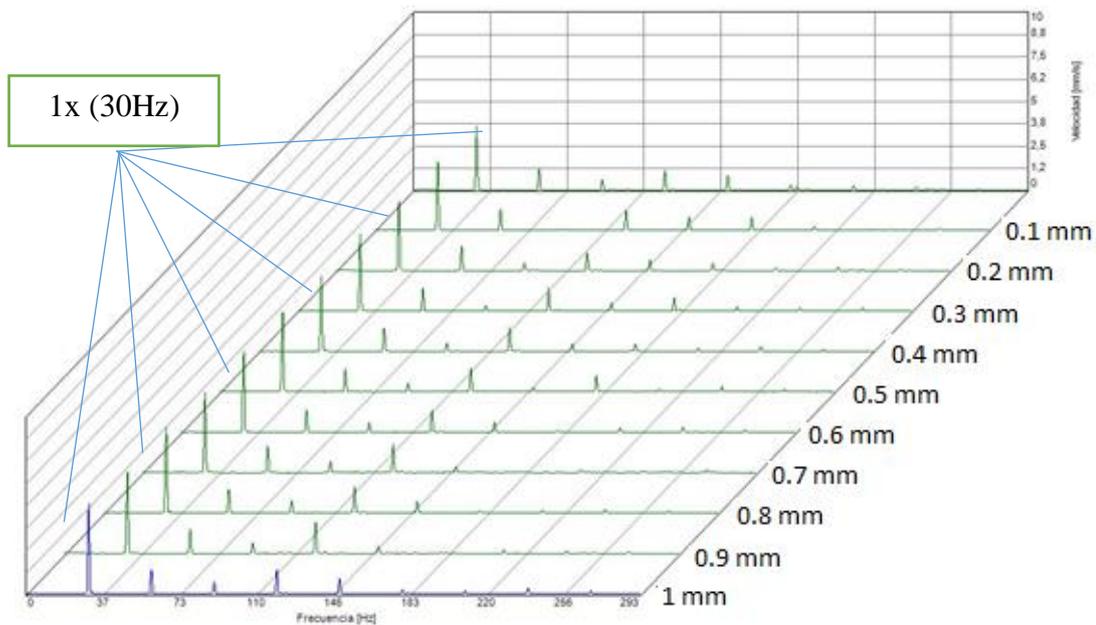


Figura 4-1. Desalineación paralela vs vibración LGV

Fuente: Autores

La Figura 4-1 indica que las mediciones realizadas con un acoplamiento rígido y desalineación paralela en la dirección radial y con los distintos niveles de desalineación proporcionados, la frecuencia fundamental 1X tuvo un nivel de vibración determinado como línea base de 4,61 mm/s cuando las máquinas fueron alineadas, pero incrementó a medida que se proporcionó niveles de desalineación lo que indicó que las dos variables son directamente proporcionales, además, se observó que existen armónicos 2X, 3X con menor amplitud que la 1X los cuales son propios de la desalineación paralela, los armónicos 4X, 5X, 6X probablemente pueden ser generados por holgura mecánica de los elementos del módulo producto de la vibración.

Tabla 4-1. Valores de desalineación paralela vs vibración LGV

Ítem	$x(mm)$	$y(mm/s)$	$x * y$	x^2	y^2
1	0,0	4,2376	0,0000	0,0000	17,9573
2	0,1	4,8640	0,4864	0,0100	23,6585
3	0,2	5,0692	1,0138	0,0400	25,6968
4	0,3	5,0686	1,5206	0,0900	25,6907
5	0,4	4,9918	1,9967	0,1600	24,9181
6	0,5	5,1460	2,5730	0,2500	26,4813
7	0,6	5,3998	3,2399	0,3600	29,1578
8	0,7	5,2498	3,6749	0,4900	27,5604
9	0,8	5,6696	4,5357	0,6400	32,1444
10	0,9	5,7750	5,1975	0,8100	33,3506
11	1,00	5,4868	5,4868	1,0000	30,1050
Sumatoria	5,500	56,9582	29,7253	3,8500	296,7208

Fuente: Autores

$$(\sum x)^2 = 30,2500$$

$$(\sum y)^2 = 3244,2365$$

$$r = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{n(\sum x^2) - (\sum x)^2} \sqrt{n(\sum y^2) - (\sum y)^2}} \quad (18)$$

$$r = \frac{11(29,7253) - (5,5)(56,9582)}{\sqrt{11(3,85) - 30,25} \sqrt{11(296,7208) - 3244,2365}} = 0,8880$$

$$r^2 = 0,7886$$

$$a = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{n(\sum x^2) - (\sum x)^2} \quad (19)$$

$$a = \frac{11(29,7253) - (5,5)(56,9582)}{11(3,85) - 30,25} = 1,1329$$

$$b = \frac{\sum y - a \sum x}{n} \quad (20)$$

$$b = \frac{56,9582 - 1,1329(5,5)}{11} = 4,6116$$

$$y = 1,1328x + 4,6116 \quad (21)$$

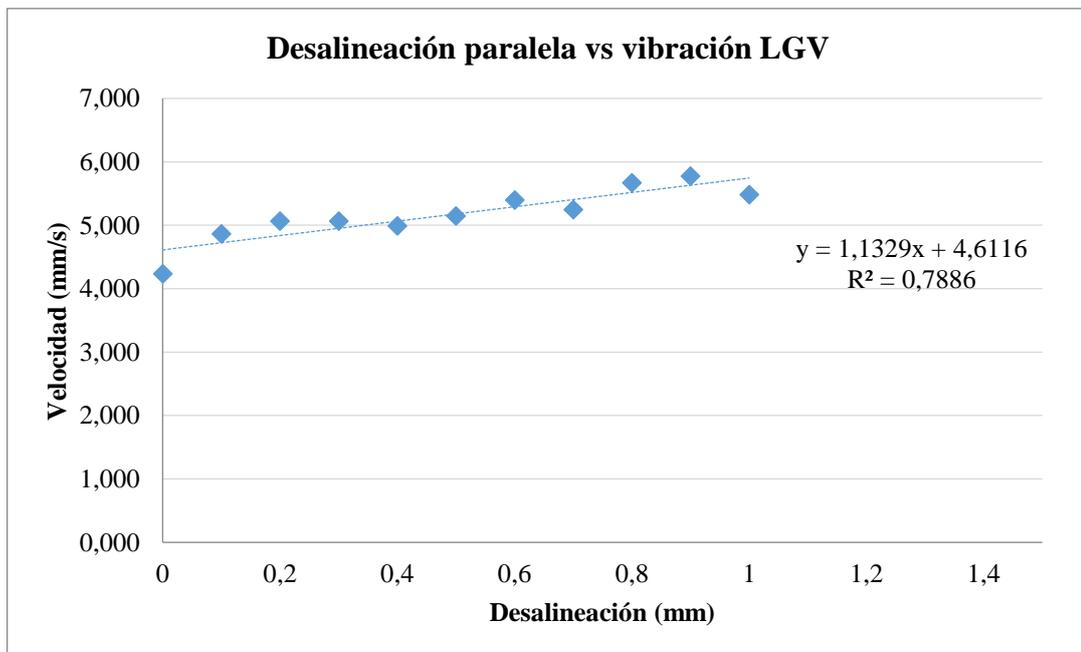


Figura 4-2. Gráfico de desalineación paralela vs vibración LGV

Fuente: Autores

4.1.2. Desalineación paralela vs vibración LGA. Se presenta los siguientes resultados.

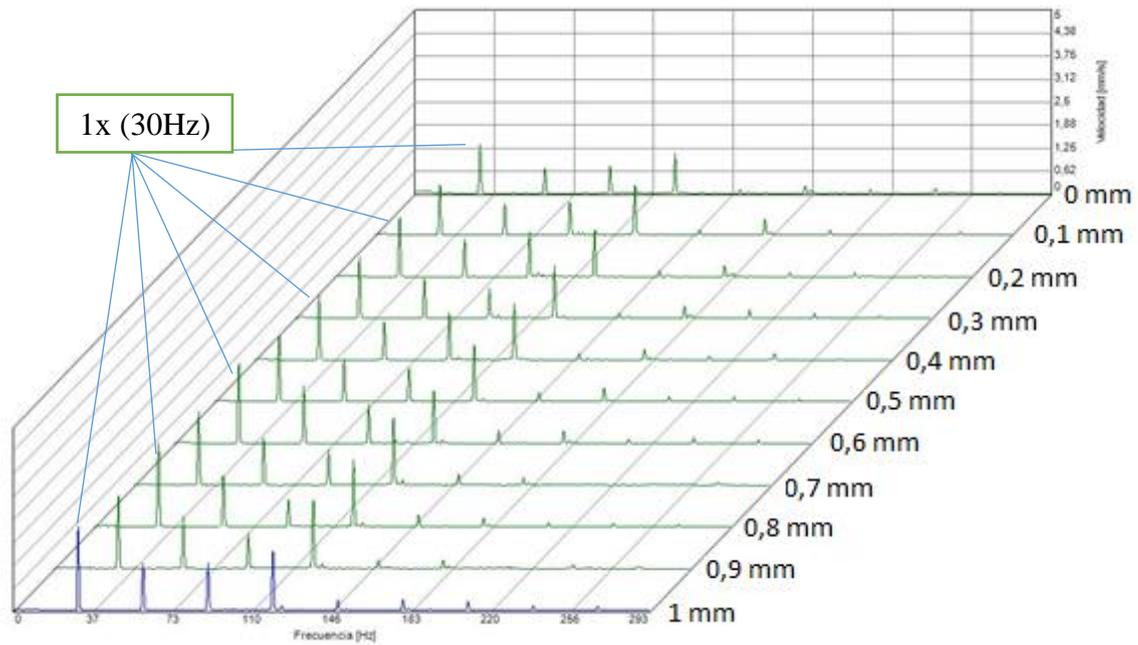


Figura 4-3. Desalineación paralela vs vibración LGA
Fuente: Autores

La Figura 4-3 indica que las mediciones realizadas con un acoplamiento rígido y desalineación paralela en la dirección axial y con los distintos niveles de desalineación proporcionados, la frecuencia fundamental 1X tuvo un nivel de vibración determinado como línea base de 2,62 mm/s cuando las máquinas fueron alineadas, pero se incrementó con una menor pendiente que en la dirección radial a medida que se proporcionó niveles de desalineación. Los armónicos 2X, 3X y 4X son propios de desalineación paralela los cuales tuvieron menor amplitud que la 1X, pero mayor amplitud que los medidos en la dirección radial, la amplitud de los armónicos 2X, 3X y 4X dependen del tipo de acoplamiento que poseen las máquinas.

Tabla 4-2. Valores de desalineación paralela vs vibración LGA

Ítem	$x(mm)$	$y(mm/s)$	$x * y$	x^2	y^2
1	0,0	2,615	0,000	0,000	6,836
2	0,1	2,862	0,286	0,010	8,192
3	0,2	2,830	0,566	0,040	8,011
4	0,3	2,652	0,796	0,090	7,034
5	0,4	2,953	1,181	0,160	8,723
6	0,5	2,894	1,447	0,250	8,373
7	0,6	3,174	1,904	0,360	10,073
8	0,7	3,158	2,211	0,490	9,974
9	0,8	3,497	2,798	0,640	12,232

Tabla 4-3. (Continua) Valores de desalineación paralela vs vibración LGA

10	0,9	3,331	2,998	0,810	11,094
11	1,0	3,388	3,388	1,000	11,477
Sumatoria	5,500	33,354	17,575	3,850	102,020

Fuente: Autores

$$(\sum x)^2 = 30,2500$$

$$(\sum y)^2 = 1112,5160$$

$$r = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{n(\sum x^2) - (\sum x)^2} \sqrt{n(\sum y^2) - (\sum y)^2}} \quad (22)$$

$$r = \frac{11(17,5746) - (5,5000)(33,3544)}{\sqrt{11(3,8500) - 30,2500} \sqrt{11(102,0196) - 1112,5160}} = 0,9112$$

$$r^2 = 0,8302$$

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

$$a = \frac{11(17,5746) - (5,5000)(33,3544)}{11(3,8500) - 30,2500} = 0,8158$$

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

$$b = \frac{33,3544 - 0,8158(5,5000)}{11} = 2,6243$$

$$y = 0,8158x + 2,6243 \quad (25)$$

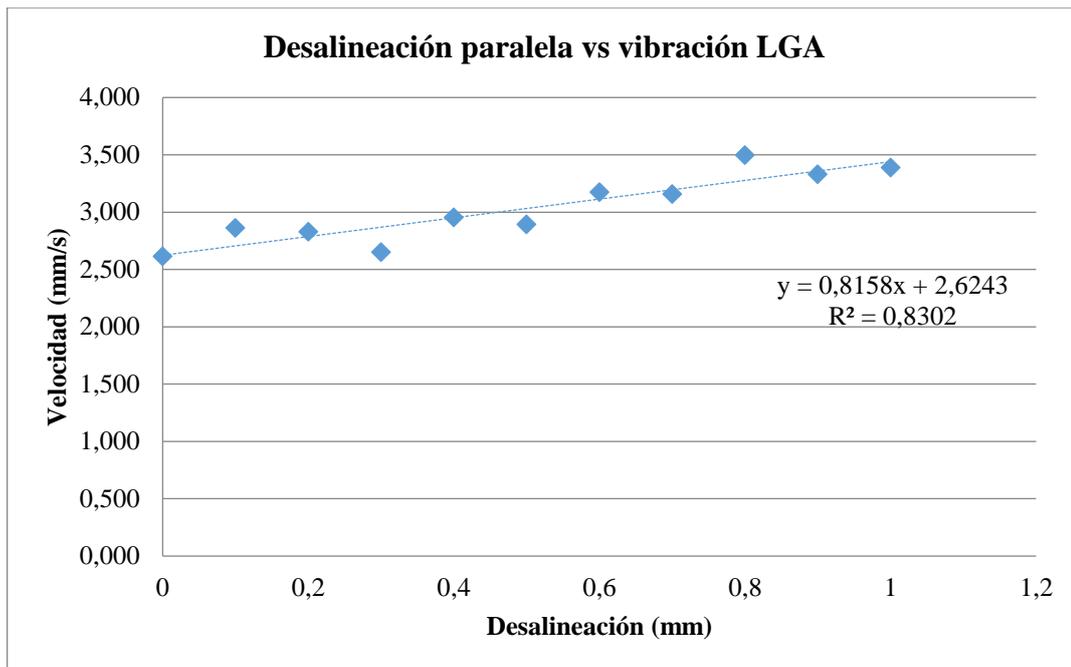


Figura 4-4. Gráfico de desalineación paralela vs vibración LGA
Fuente: Autores

4.1.3. Desalineación angular vs vibración LGV. Se presenta los siguientes resultados.

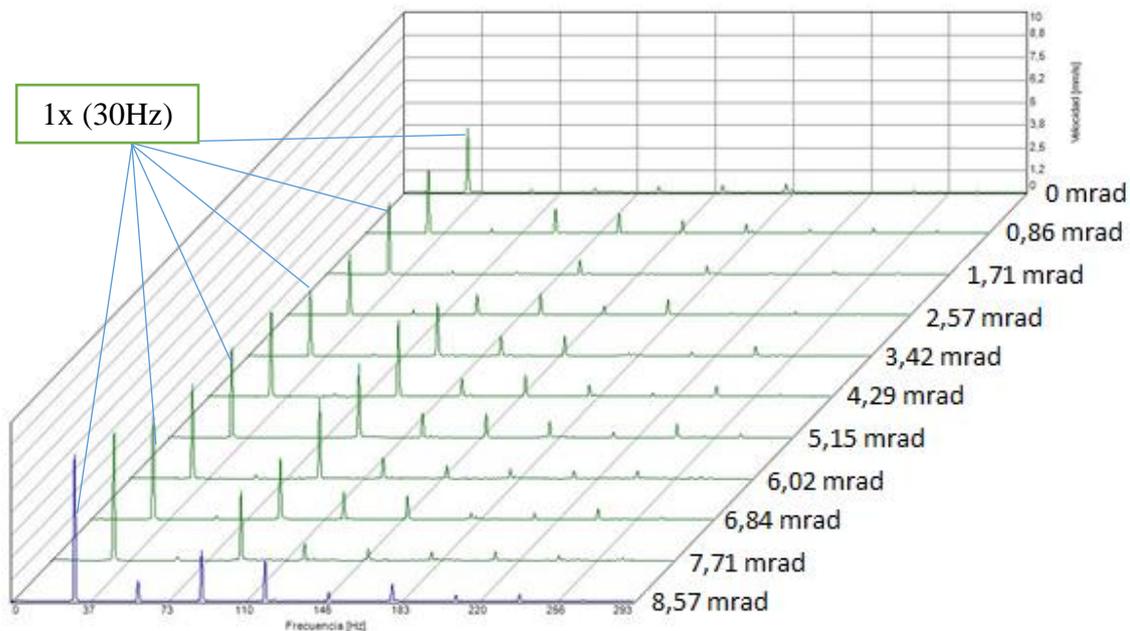


Figura 4-5. Desalineación angular vs vibración LGV
Fuente: Autores

La Figura 4-5 indica que las mediciones realizadas con un acoplamiento rígido y desalineación angular en la dirección vertical y con los distintos niveles de desalineación

proporcionados, la frecuencia fundamental 1X tuvo un nivel de vibración determinado como línea base de 4,60 mm/s cuando las máquinas fueron alineadas, pero se incrementó con una menor pendiente que en la dirección axial a medida que se proporcionó niveles de desalineación. El armónico 2X tuvo un nivel de vibración bajo en todos los niveles de desalineación. El armónico 3X es propio de desalineación angular el cual tuvo menor amplitud que la 1X, Los armónicos 4X, 5X, 6X probablemente son originados por holgura mecánica de los elementos del módulo o también son causados por un nivel de desalineación severo.

Tabla 4-4. Valores de desalineación angular vs vibración LGV

Ítem	x(mrad)	y (mm/s)	x * y	x ²	y ²
1	0,00	4,2810	0,0000	0,0000	18,3270
2	0,86	4,8868	4,1792	0,7314	23,8808
3	1,71	5,5764	9,5380	2,9255	31,0962
4	2,57	6,1240	15,7119	6,5825	37,5034
5	3,42	6,3148	21,6020	11,7022	39,8767
6	4,29	7,0544	30,2881	18,4342	49,7646
7	5,15	7,7304	39,8017	26,5093	59,7591
8	6,02	7,1180	42,8602	36,2571	50,6659
9	6,84	8,6826	59,4037	46,8087	75,3875
10	7,71	8,6660	66,8526	59,5113	75,0996
11	8,57	9,8230	84,1789	73,4375	96,4913
Sumatoria	47,1413	76,2574	374,4163	282,8997	557,8521

Fuente: Autores

$$(\sum x)^2 = 2222,3062$$

$$(\sum y)^2 = 5815,1911$$

$$r = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{n(\sum x^2) - (\sum x)^2} \sqrt{n(\sum y^2) - (\sum y)^2}} \quad (26)$$

$$r = \frac{11(374,4163) - (47,1413)(76,2574)}{\sqrt{11(282,8997) - 2222,3062} \sqrt{11(557,8521) - 5815,1911}} = 0,97975$$

$$r^2 = 0,9599$$

$$a = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{n(\sum x^2) - (\sum x)^2} \quad (27)$$

$$a = \frac{11(374,4163) - (47,1413)(76,2574)}{11(282,8997) - 2222,3062} = 0,5887$$

$$b = \frac{\sum y - a \sum x}{n} \quad (28)$$

$$b = \frac{76,2574 - 0,5887(47,1413)}{11} = 4,4096$$

$$y = 0,5887x + 4,4096 \tag{29}$$

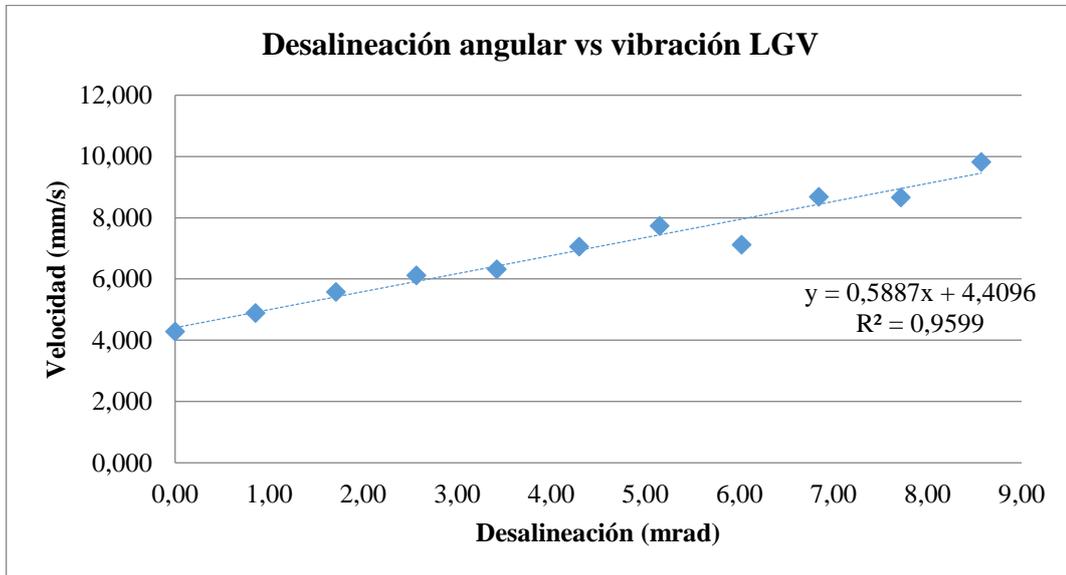


Figura 4-6. Gráfico de desalineación angular vs vibración LGV
Fuente: Autores

4.1.4. Desalineación angular vs vibración LGA. Se presenta los siguientes resultados.

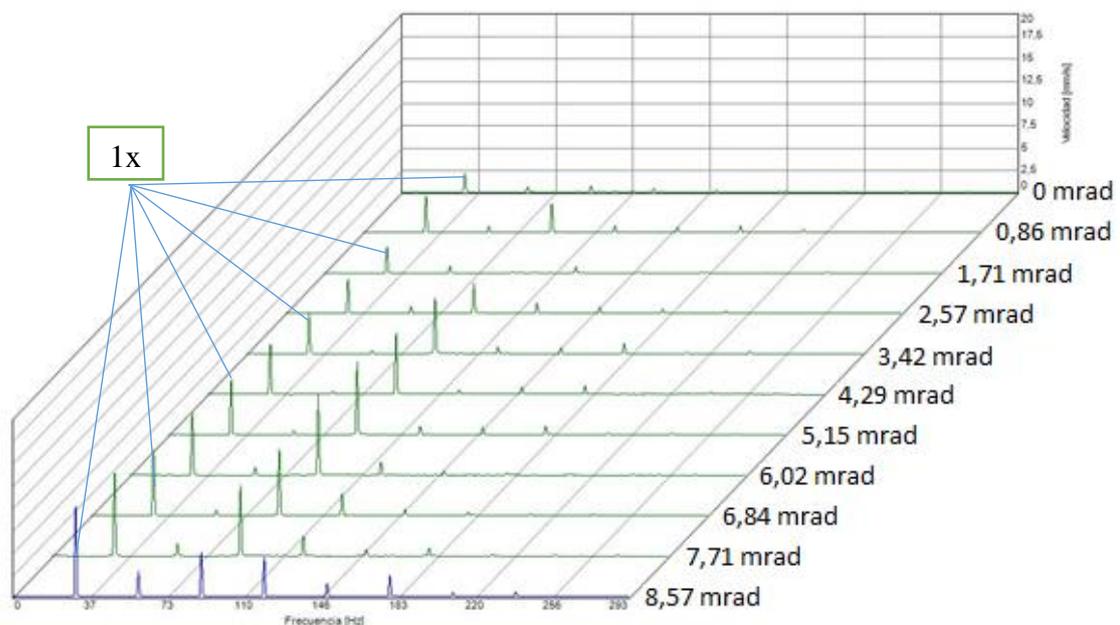


Figura 4-7. Desalineación angular vs vibración LGA
Fuente: Autores

La Figura 4-7 indica que las mediciones realizadas con un acoplamiento rígido y desalineación angular en la dirección axial y con los distintos niveles de desalineación proporcionados, la frecuencia fundamental 1X tuvo un nivel de vibración determinado como línea base de 4,07 mm/s cuando las máquinas fueron alineadas, pero tuvo un incremento con mayor pendiente que en la dirección vertical a medida que se proporcionó niveles de desalineación. El armónico 2X tuvo una amplitud baja. El armónico 3X es propio de la desalineación angular los cuales tuvieron menor amplitud que la 1X.

Tabla 4-5. Valores de desalineación angular vs vibración LGA

Ítem	x(mrad)	y (mm/s)	x * y	x ²	y ²
1	0,00	3,9242	0,0000	0,0000	15,3993
2	0,86	5,2728	4,5094	0,7314	27,8024
3	1,71	4,8286	8,2589	2,9255	23,3154
4	2,57	7,1308	18,2950	6,5825	50,8483
5	3,42	9,0068	30,8109	11,7022	81,1224
6	4,29	9,1740	39,3887	18,4342	84,1623
7	5,15	10,3942	53,5168	26,5093	108,0394
8	6,02	10,7324	64,6239	36,2571	115,1844
9	6,84	10,5806	72,3892	46,8087	111,9491
10	7,71	11,8838	91,6759	59,5113	141,2247
11	8,57	14,5318	124,5312	73,4375	211,1732
Sumatoria	47,1413	97,4600	507,9999	282,8997	970,2210

Fuente: Autores

$$(\sum x)^2 = 2222,3062$$

$$(\sum y)^2 = 9498,4516$$

$$r = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{n(\sum x^2) - (\sum x)^2} \sqrt{n(\sum y^2) - (\sum y)^2}} \quad (30)$$

$$r = \frac{11(507,9999) - (47,1413)(97,4600)}{\sqrt{11(282,8997) - 2222,3062} \sqrt{11(970,2210) - 9498,4516}} = 0,97227$$

$$r^2 = 0,9453$$

$$a = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{n(\sum x^2) - (\sum x)^2} \quad (31)$$

$$a = \frac{11(507,9999) - (47,1413)(97,4600)}{11(282,8997) - 2222,3062} = 1,1169$$

$$b = \frac{\sum y - a \sum x}{n} \quad (32)$$

$$b = \frac{97,4600 - 1,1169(47,1413)}{11} = 4,0734$$

$$y = 1,1169x + 4,0734 \quad (33)$$

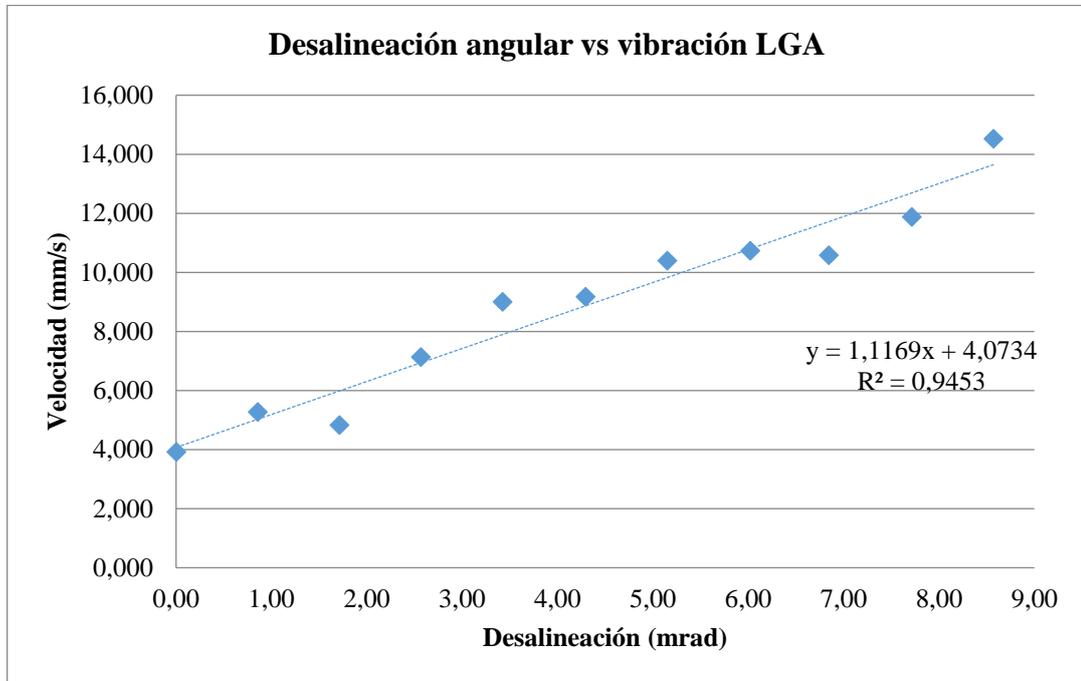


Figura 4-8. Gráfico de desalineación angular vs vibración LGA
Fuente: Autores

4.2. Resultados con acople flexible de desalineación y vibración

Se realizó cinco repeticiones, cada repetición tuvo once niveles de desalineación (tratamientos), luego se calculó la media de cada nivel de desalineación, luego se validó con el estadístico r de Pearson.

4.2.1. Desalineación paralela vs vibración LGV. Se presenta los siguientes resultados.

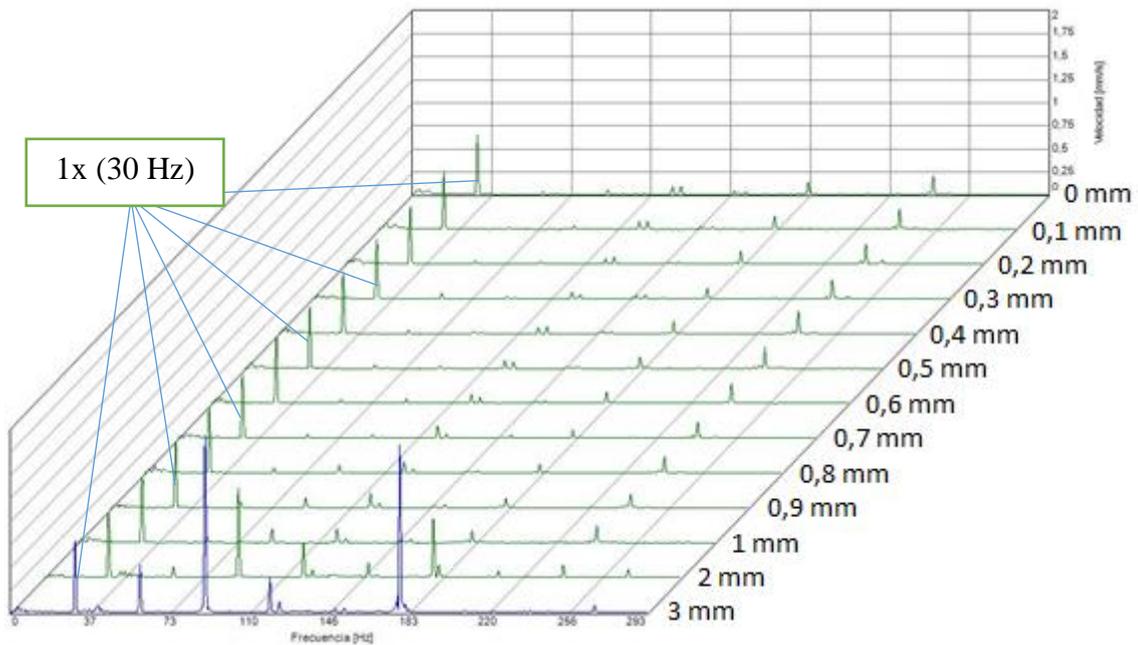


Figura 4-9. Desalineación paralela vs vibración LGV
Fuente: Autores

La Figura 4.9 indica que las mediciones realizadas con un acoplamiento flexible y desalineación paralela en la dirección radial y con los distintos niveles de desalineación proporcionados, la frecuencia fundamental 1X tuvo un nivel de vibración determinado como línea base de 0,69 mm/s cuando las máquinas fueron alineadas, pero incrementó a medida que se proporcionó niveles de desalineación lo que indicó que las dos variables son directamente proporcionales, además, se observó que existen el armónico 2X, con una amplitud muy baja y el armónico 3X con menor amplitud que la 1X los cuales son propios de la desalineación paralela, los armónicos 4X, 5X, 6X probablemente pueden ser generados por holgura mecánica de los elementos del módulo producto de la vibración. Además, con niveles de desalineación mayores a 1mm se observó que los picos de los armónicos 4x y 7x se elevaron esto se produce por una condición severa de desalineación.

Tabla 4-6. Valores de desalineación paralela vs vibración LGV

Ítem	$x(mm)$	$y(mm/s)$	$x * y$	x^2	y^2
1	0,0	0,72060	0,00000	0,00000	0,51926
2	0,1	0,69420	0,06942	0,01000	0,48191
3	0,2	0,70820	0,14164	0,04000	0,50155
4	0,3	0,71880	0,21564	0,09000	0,51667
5	0,4	0,72040	0,28816	0,16000	0,51898
6	0,5	0,72380	0,36190	0,25000	0,52389

Tabla 4-7. (Continua) Valores de desalineación paralela vs vibración LGV

7	0,6	0,76100	0,45660	0,36000	0,57912
8	0,7	0,77280	0,54096	0,49000	0,59722
9	0,8	0,78600	0,62880	0,64000	0,61780
10	0,9	0,79940	0,71946	0,81000	0,63904
11	1,0	0,80720	0,80720	1,00000	0,65157
Sumatoria	5,5	8,21240	4,22978	3,85000	6,14701

Fuente: Autores

$$(\sum x)^2 = 30,25000$$

$$(\sum y)^2 = 67,44351$$

$$r = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{n(\sum x^2) - (\sum x)^2} \sqrt{n(\sum y^2) - (\sum y)^2}} \quad (34)$$

$$r = \frac{11(4,22978) - (5,50000)(6,14701)}{\sqrt{11(3,85000) - 30,25000} \sqrt{11(6,14701) - 67,44351}} = 0,9379$$

$$r^2 = 0,8797$$

$$a = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{n(\sum x^2) - (\sum x)^2} \quad (35)$$

$$a = \frac{11(4,22978) - (5,50000)(6,14701)}{11(3,85000) - 30,25000} = 0,1123$$

$$b = \frac{\sum y - a \sum x}{n} \quad (36)$$

$$b = \frac{6,14701 - 0,1123(5,50000)}{11} = 0,6904$$

$$y = 0,1123x + 0,6904 \quad (37)$$

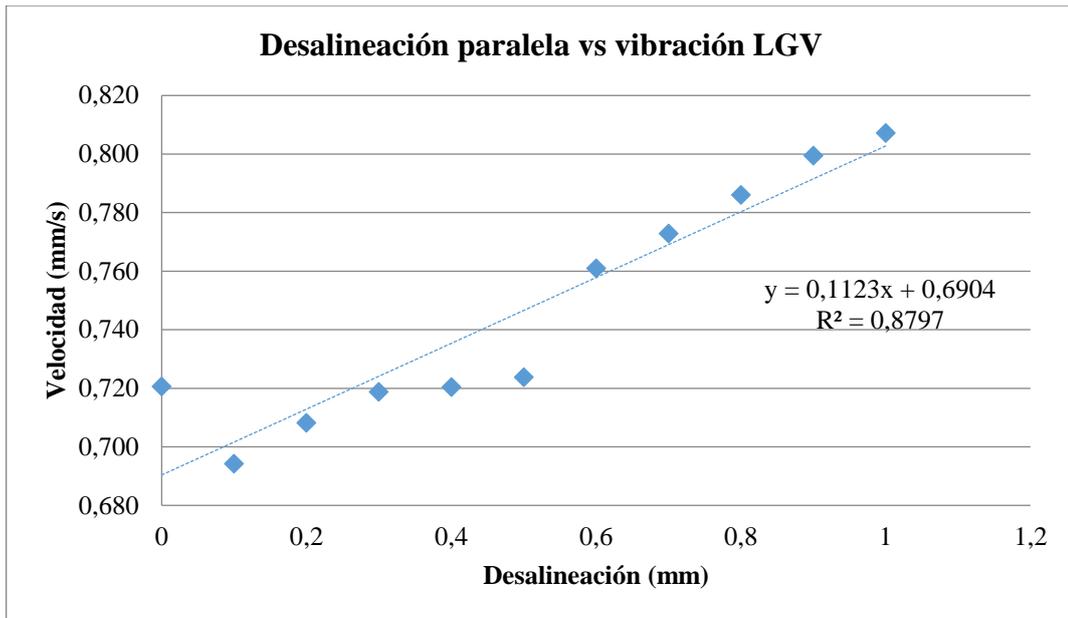


Figura 4-10. Gráfico de desalineación paralela vs vibración LGV
Fuente: Autores

4.2.2. Desalineación paralela vs vibración LGA. Se tiene los siguientes resultados.

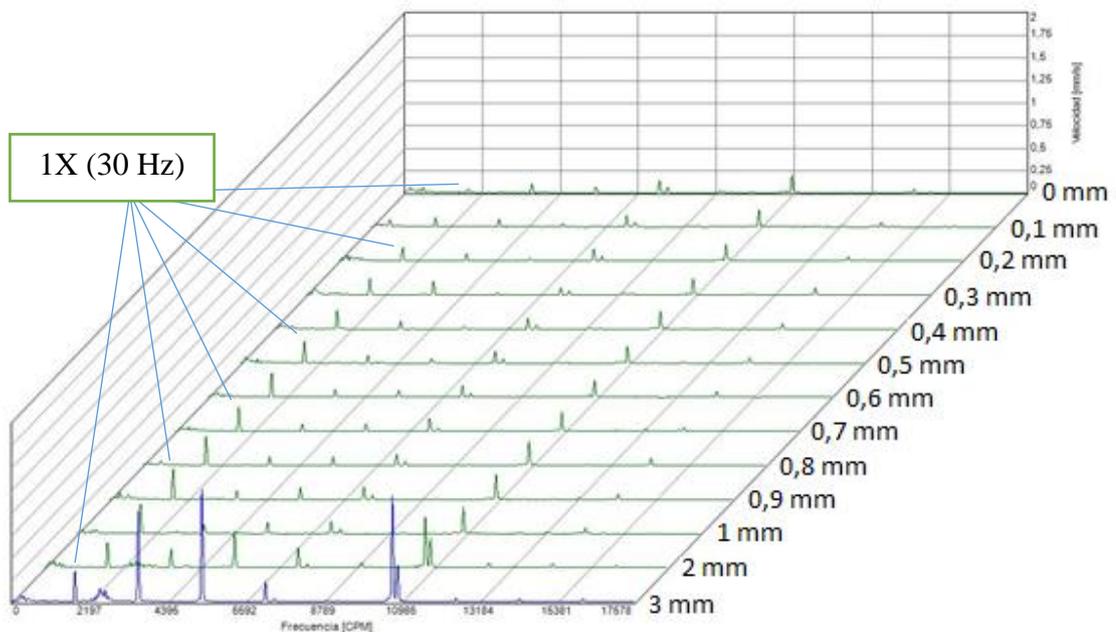


Figura 4-11. Desalineación paralela vs vibración LGA
Fuente: Autores

La Figura 4-11 indica que las mediciones realizadas con un acoplamiento flexible y desalineación paralela en la dirección axial y con los distintos niveles de desalineación proporcionados, la frecuencia fundamental 1X tuvo un nivel de vibración determinado

como línea base de 0,39 mm/s cuando las máquinas fueron alineadas, pero se incrementó con una menor pendiente que en la dirección radial a medida que se proporcionó niveles de desalineación. Los armónicos 2X, 3X y 4X son propios de desalineación paralela los cuales tuvieron menor amplitud que la 1X, la amplitud de los armónicos 2X, 3X y 4X dependen del tipo de acoplamiento que poseen las máquinas.

Tabla 4-8. Valores de desalineación paralela vs vibración LGA

Ítem	x(mm)	y (mm/s)	x * y	x ²	y ²
1	0	0,4134	0,0000	0,0000	0,1709
2	0,1	0,4016	0,0402	0,0100	0,1613
3	0,2	0,4006	0,0801	0,0400	0,1605
4	0,3	0,4108	0,1232	0,0900	0,1688
5	0,4	0,4196	0,1678	0,1600	0,1761
6	0,5	0,4134	0,2067	0,2500	0,1709
7	0,6	0,4118	0,2471	0,3600	0,1696
8	0,7	0,4190	0,2933	0,4900	0,1756
9	0,8	0,4476	0,3581	0,6400	0,2003
10	0,9	0,4698	0,4228	0,8100	0,2207
11	1	0,4924	0,4924	1,0000	0,2425
Sumatoria	5,5	4,7000	2,4317	3,8500	2,0170

Fuente: Autores

$$(\sum x)^2 = 30,25000$$

$$(\sum y)^2 = 22,09000$$

$$r = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{n(\sum x^2) - (\sum x)^2} \sqrt{n(\sum y^2) - (\sum y)^2}} \quad (38)$$

$$r = \frac{11(2,43174) - (5,5000)(4,70000)}{\sqrt{11(3,85000) - 30,25000} \sqrt{11(2,01704) - 22,09000}} = 0,8281$$

$$r^2 = 0,6857$$

$$a = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{n(\sum x^2) - (\sum x)^2} \quad (39)$$

$$a = \frac{11(2,43174) - (5,5000)(4,70000)}{11(3,85000) - 30,25000} = 0,0743$$

$$b = \frac{\sum y - a \sum x}{n} \quad (40)$$

$$b = \frac{4,70000 - 0,0743(5,5000)}{11} = 0,3901$$

$$y = 0,0743x + 0,3901$$

(41)

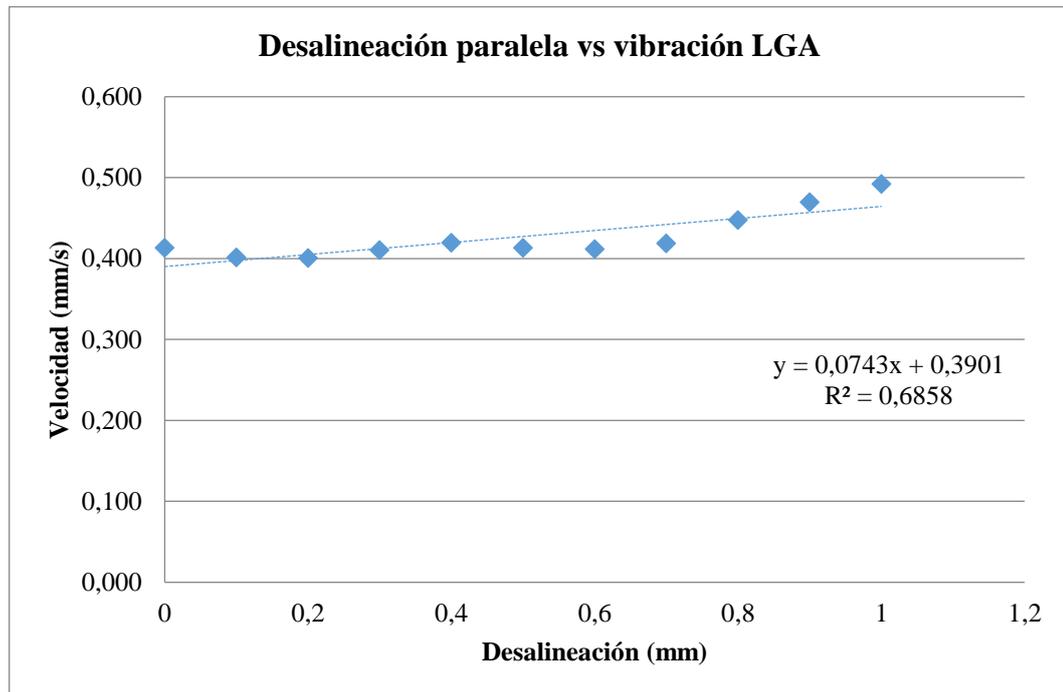


Figura 4-12. Gráfico de desalineación paralela vs vibración LGA
Fuente: Autores

4.2.3. Desalineación angular vs vibración LGV. Se tiene los siguientes resultados.

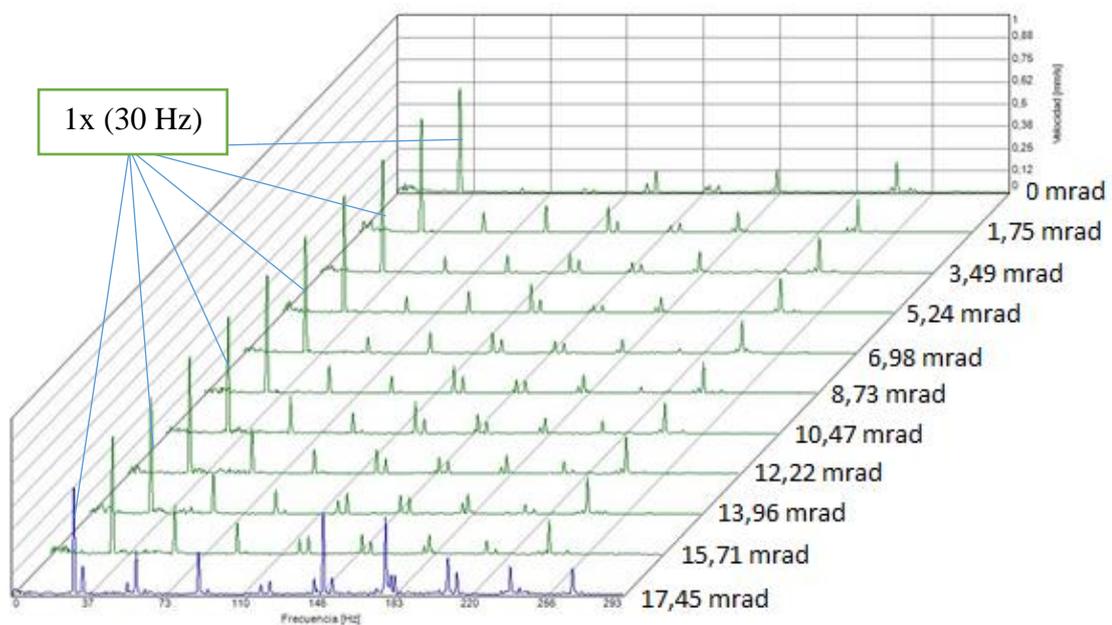


Figura 4-13. Desalineación angular vs vibración LGV
Fuente: Autores

La Figura 4-13 indica que las mediciones realizadas con un acoplamiento flexible y desalineación angular en la dirección vertical y con los distintos niveles de desalineación proporcionados, la frecuencia fundamental 1X tuvo un nivel de vibración determinado como línea base de 0,696 mm/s cuando las máquinas fueron alineadas, pero se incrementó con una menor pendiente que en la dirección axial a medida que se proporcionó niveles de desalineación. Además, se pudo observar que existen los armónicos que son múltiplos de la frecuencia fundamental 1x, probablemente ocurrió porque hubo holgura mecánica de los elementos del módulo.

Tabla 4-9. Valores de desalineación angular vs vibración LGV

Ítem	$x(mrad)$	$y (mm/s)$	$x * y$	x^2	y^2
1	0,00	0,69900	0,00000	0,00000	0,48860
2	1,75	0,74250	1,29591	3,04617	0,55131
3	3,49	0,80200	2,79951	12,18470	0,64320
4	5,24	0,78200	4,09454	27,41557	0,61152
5	6,98	0,81650	5,70025	48,73879	0,66667
6	8,73	0,74025	6,45990	76,15435	0,54797
7	10,47	0,86600	9,06873	109,66227	0,74996
8	12,22	0,86300	10,54353	149,26254	0,74477
9	13,96	0,87125	12,16494	194,95515	0,75908
10	15,71	0,95000	14,92257	246,74011	0,90250
11	17,45	1,06850	18,64884	304,61742	1,14169
Sumatoria	95,9931	9,20100	85,69872	1172,77707	7,80727

Fuente: Autores

$$(\sum x)^2 = 9214,67695$$

$$(\sum y)^2 = 84,65840$$

$$r = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{n(\sum x^2) - (\sum x)^2} \sqrt{n(\sum y^2) - (\sum y)^2}} \quad (42)$$

$$r = \frac{11(85,69872) - (95,99311)(9,20100)}{\sqrt{11(1172,77707) - 9214,67695} \sqrt{11(7,80727) - 84,65840}} = 0,88602$$

$$r^2 = 0,7850$$

$$a = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{n(\sum x^2) - (\sum x)^2} \quad (43)$$

$$a = \frac{11(85,69872) - (95,99311)(9,20100)}{11(1172,77707) - 9214,67695} = 0,0161$$

$$b = \frac{\sum y - a \sum x}{n} \quad (44)$$

$$b = \frac{9,20100 - 0,0161(95,99311)}{11} = 0,6960$$

$$y = 0,0161x + 0,6960 \tag{45}$$

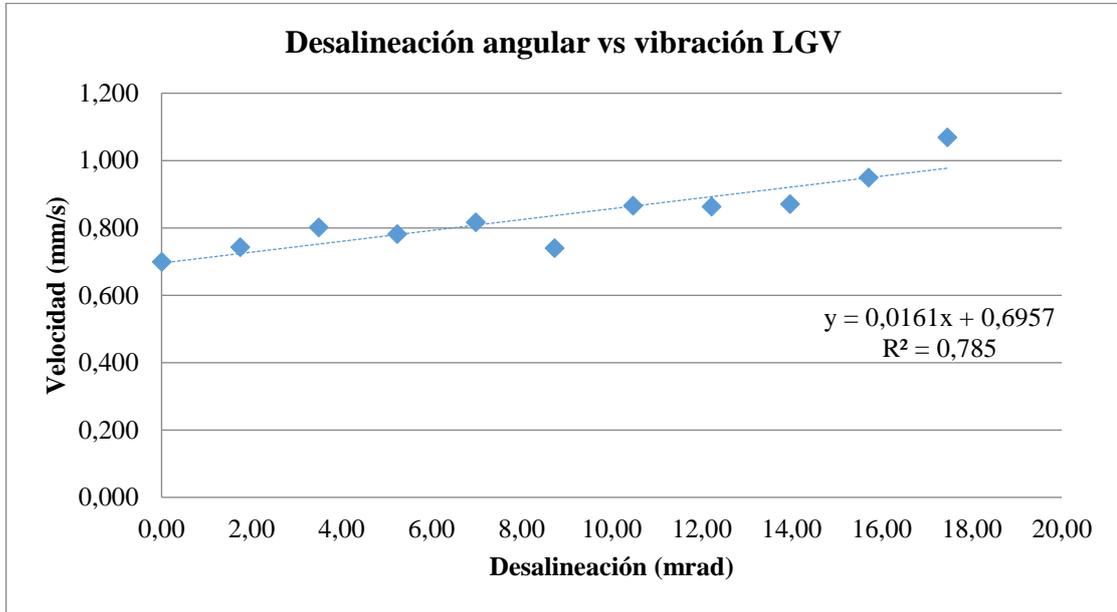


Figura 4-14. Gráfico de desalineación angular vs vibración LGV
Fuente: Autores

4.2.4. Desalineación angular vs vibración LGA. Se presenta los siguientes resultados.

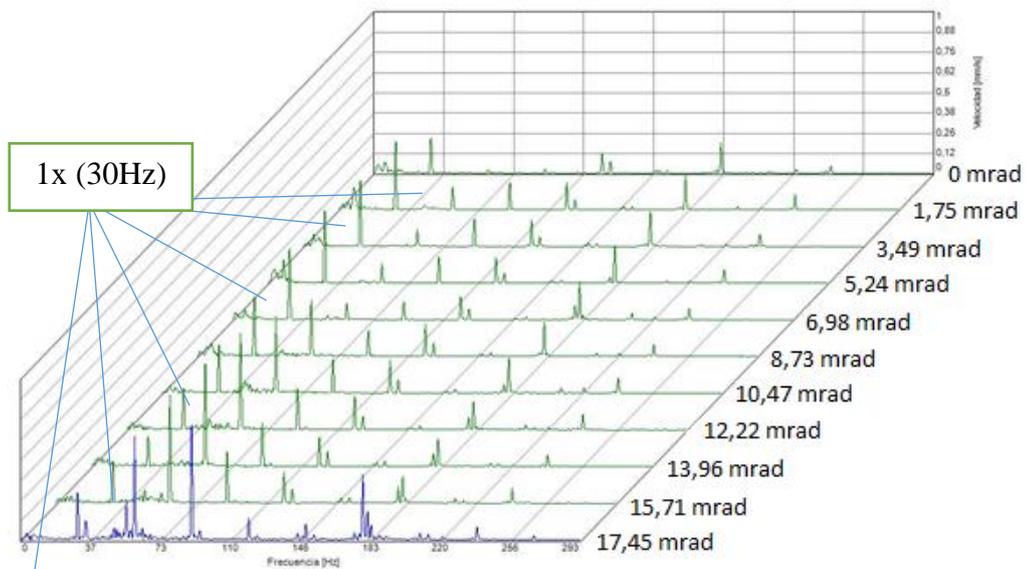


Figura 4-15. Desalineación angular vs vibración LGA
Fuente: Autores

La Figura 4-15 indica que las mediciones realizadas con un acoplamiento flexible y desalineación angular en la dirección axial y con los distintos niveles de desalineación proporcionados, la frecuencia fundamental 1X y el armónico 2x predominaron en el espectro propio de la desalineación angular, el armónico 3x tuvo menor amplitud que los armónicos 1x y 2x. El armónico 1x tuvo un nivel de vibración determinado como línea base de 0,41 mm/s cuando las máquinas fueron alineadas, pero tuvo un incremento con mayor pendiente que en la dirección vertical a medida que se proporcionó niveles de desalineación. Se evidenció más armónicos probablemente hubo holgura mecánica entre los elementos del módulo o pudo ser también por elementos del módulo.

Tabla 4-10. Valores de desalineación angular vs vibración LGA

Ítem	$x(mrad)$	$y(mm/s)$	$x * y$	x^2	y^2
1	0,00	0,35525	0,00000	0,00000	0,12620
2	1,75	0,49275	0,86001	3,04617	0,24280
3	3,49	0,58150	2,02982	12,18470	0,33814
4	5,24	0,58950	3,08661	27,41557	0,34751
5	6,98	0,58925	4,11374	48,73879	0,34722
6	8,73	0,58600	5,11381	76,15435	0,34340
7	10,47	0,63225	6,62091	109,66227	0,39974
8	12,22	0,65700	8,02677	149,26254	0,43165
9	13,96	0,69200	9,66214	194,95515	0,47886
10	15,71	0,79400	12,47212	246,74011	0,63044
11	17,45	0,98550	17,20022	304,61742	0,97121
Sumatoria	95,99311	6,95500	69,18616	1172,77707	4,65717

Fuente: Autores

$$(\sum x)^2 = 9214,67695$$

$$(\sum y)^2 = 48,37203$$

$$r = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{n(\sum x^2) - (\sum x)^2} \sqrt{n(\sum y^2) - (\sum y)^2}} \quad (46)$$

$$r = \frac{11(69,18616) - (95,99311)(6,95500)}{\sqrt{11(1172,77707) - 9214,67695} \sqrt{11(4,65717) - 48,37203}} = 0,91034$$

$$r^2 = 0,8287$$

$$a = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{n(\sum x^2) - (\sum x)^2} \quad (47)$$

$$a = \frac{11(69,18616) - (95,99311)(6,95500)}{11(1172,77707) - 9214,67695} = 0,0253$$

$$b = \frac{\Sigma y - a \Sigma x}{n} \quad (48)$$

$$b = \frac{6,95500 - 0,0253(95,99311)}{11} = 0,4115$$

$$y = 0,0253x + 0,4115 \quad (49)$$

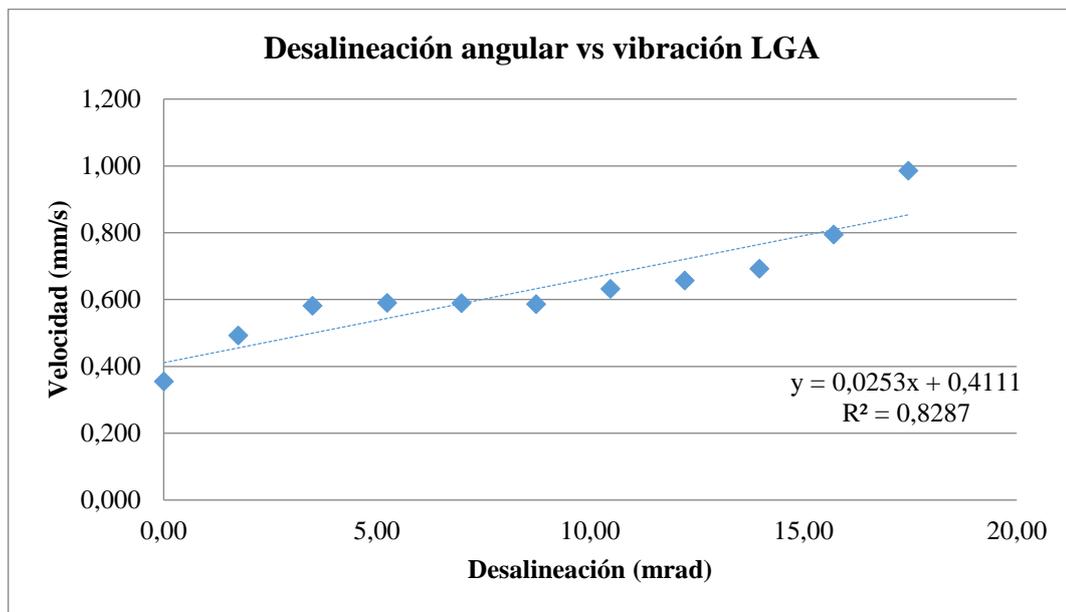


Figura 4-16. Gráfico de desalineación angular vs vibración LGA
Fuente: Autores

4.3. Resultados con acople rígido de desalineación y consumo energético

Se realizó cinco repeticiones, cada repetición tuvo once niveles de desalineación (tratamientos), luego se calculó la media de cada nivel de desalineación, luego se validó con el estadístico r de Pearson.

4.3.1. Desalineación paralela vs consumo energético. Se presenta los siguientes resultados.

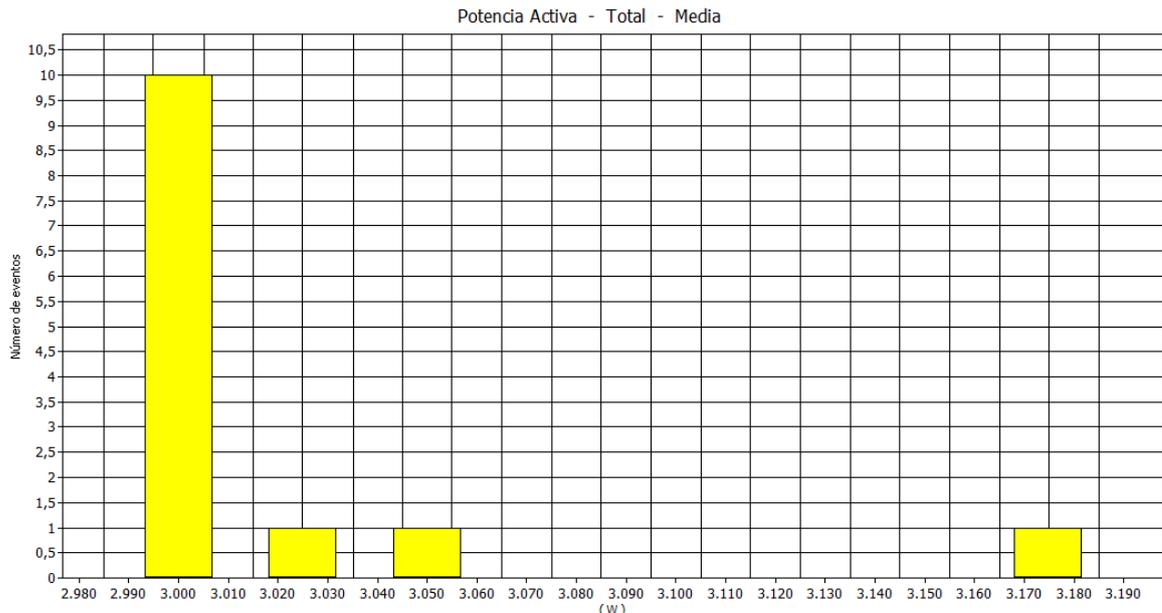


Figura 4-17. Fluctuación de la potencia activa en la desalineación paralela
Fuente: Autores

En la Figura 4-17 se observa que la toma de datos realizado con el analizador de calidad de la energía Fluke 435 II, la potencia activa se registró durante 2 minutos, para lo cual el módulo estuvo desalineado paralelamente y se usó un acople rígido, se mostró un valor máximo de 3180W, un valor mínimo de 3000W y un valor medio de 3020,77W este último mencionado fue el utilizado para el análisis de consumo energético.

Tabla 4-11. Valores de desalineación paralela vs consumo energético

Ítem	$x(mm)$	$y(W)$	$x * y$	x^2	y^2
1	0,0	1086,350	0,000	0,000	1180155,386
2	0,1	1089,253	108,925	0,010	1186471,278
3	0,2	1095,871	219,174	0,040	1200933,852
4	0,3	1105,480	331,644	0,090	1222086,277
5	0,4	1107,377	442,951	0,160	1226284,641
6	0,5	1107,541	553,771	0,250	1226648,138
7	0,6	1110,840	666,504	0,360	1233965,364
8	0,7	1122,786	785,950	0,490	1260647,845
9	0,8	1117,095	893,676	0,640	1247901,617
10	0,9	1133,222	1019,900	0,810	1284191,526
11	1,0	1139,542	1139,542	1,000	1298556,739
Sumatoria	5,500	12215,357	6162,037	3,850	13567842,663

Fuente: Autores

$$(\sum x)^2 = 30,250$$

$$(\sum y)^2 = 149214955,794$$

$$r = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{n(\sum x^2) - (\sum x)^2} \sqrt{n(\sum y^2) - (\sum y)^2}} \quad (50)$$

$$r = \frac{11(6162,037) - (5,500)(12215,357)}{\sqrt{11(3,850) - 30,250} \sqrt{11(13567842,663) - 149214955,794}} = 0,9714$$

$$r^2 = 0,9436$$

$$a = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{n(\sum x^2) - (\sum x)^2} \quad (51)$$

$$a = \frac{11(6162,037) - (5,500)(12215,357)}{11(3,850) - 30,250} = 49,417$$

$$b = \frac{\sum y - a \sum x}{n} \quad (52)$$

$$b = \frac{12215,357 - 49,417(5,500)}{11} = 1085,8$$

$$y = 49,417x + 1085,8 \quad (53)$$

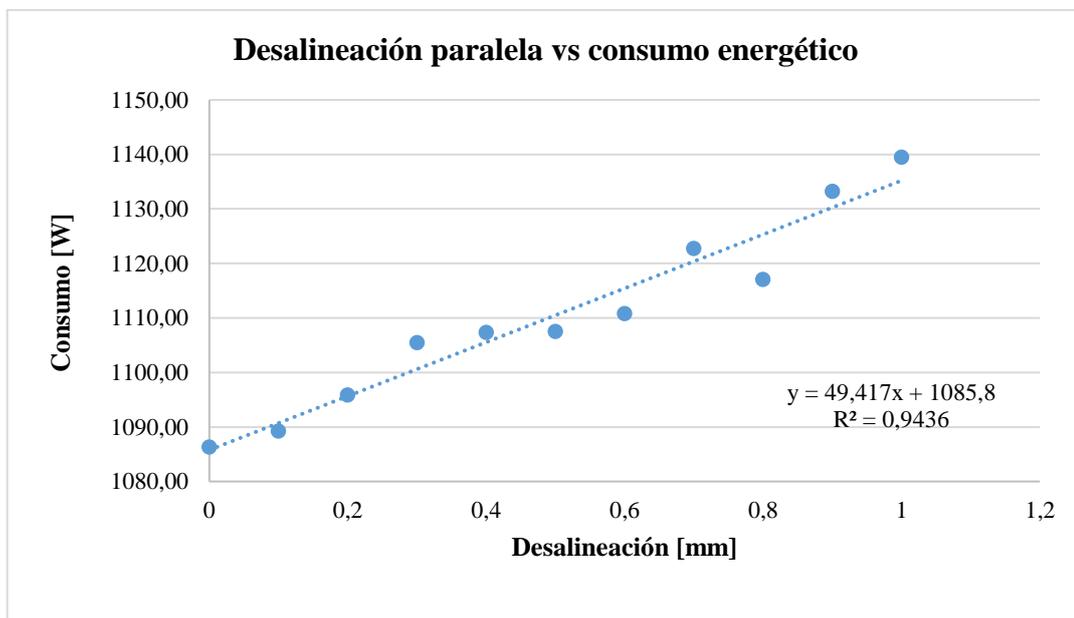


Figura 4-18. Gráfico de desalineación paralela vs consumo energético
Fuente: Autores

4.3.2. Desalineación angular vs consumo energético. Se presenta los siguientes resultados.

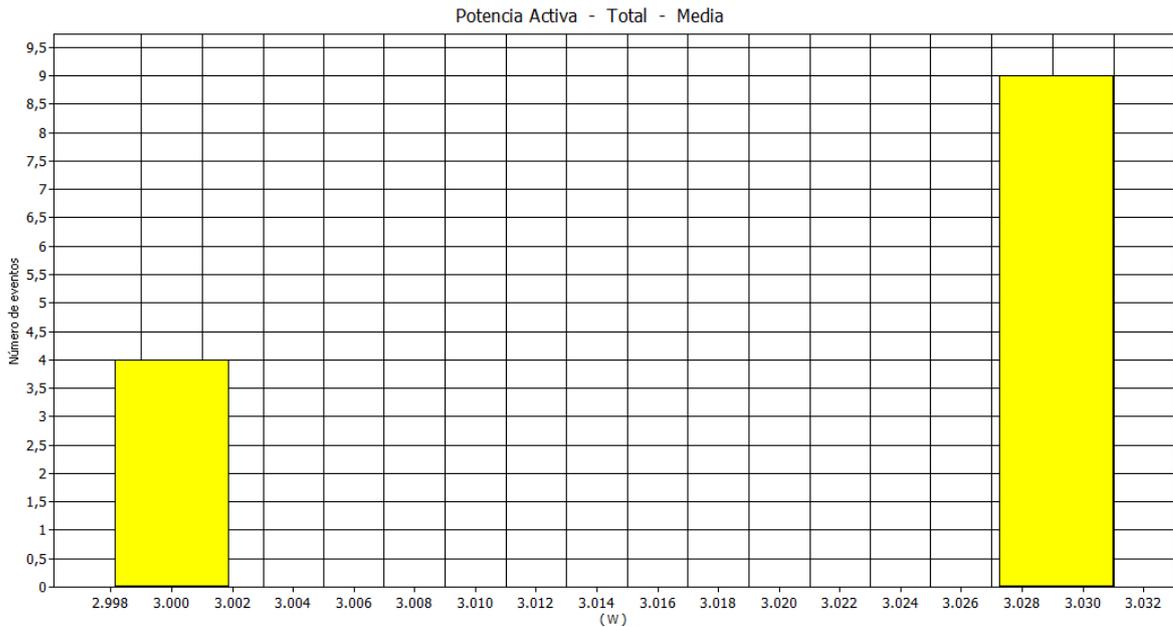


Figura 4-19. Fluctuación de la potencia activo en la desalineación angular
Fuente: Autores

En la Figura 4-19 se observa que la toma de datos realizado con el analizador de calidad de la energía Fluke 435 II, la potencia activa se registró durante 2 minutos, para lo cual el módulo estuvo desalineado angularmente y se usó un acople rígido, se mostró un valor máximo de 3030W, un valor mínimo de 3000W y un valor medio de 3020,77W este último mencionado fue el utilizado para el análisis de consumo energético.

Tabla 4-12. Valores de desalineación angular vs consumo energético

Ítem	$x(mrad)$	$y (W)$	$x * y$	x^2	y^2
1	0,00	1110,25388	0,00000	0,00000	1232663,68782
2	0,86	1118,93952	956,92976	0,73139	1252025,65630
3	1,71	1122,65521	1920,21491	2,92555	1260354,71190
4	2,57	1136,52009	2915,89458	6,58248	1291677,91422
5	3,42	1131,29389	3869,98141	11,70218	1279825,85486
6	4,29	1143,23111	4908,47417	18,43423	1306977,37967
7	5,15	1143,46213	5887,36781	26,50933	1307505,64098
8	6,02	1171,05047	7051,34682	36,25709	1371359,20509
9	6,84	1162,91160	7956,28141	46,80873	1352363,37919
10	7,71	1176,75728	9077,92375	59,51128	1384757,69396
11	8,57	1217,42189	10432,77801	73,43747	1482116,06072
Sumatoria	47,14134	12634,49707	54977,19263	282,89972	14521627,18472

Fuente: Autores

$$(\sum x)^2 = 2222,30623$$

$$(\sum y)^2 = 159630516,16522$$

$$r = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{n(\sum x^2) - (\sum x)^2} \sqrt{n(\sum y^2) - (\sum y)^2}} \quad (54)$$

$$r = \frac{11(54977,19263) - (47,14134)(12634,49707)}{\sqrt{11(282,89972) - 2222,30623} \sqrt{11(14521627,18472) - 159630516,16522}}$$

$$r = 0,93536$$

$$r^2 = 0,8749$$

$$a = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{n(\sum x^2) - (\sum x)^2} \quad (55)$$

$$a = \frac{11(54977,19263) - (47,14134)(12634,49707)}{11(282,89972) - 2222,30623} = 10,277$$

$$b = \frac{\sum y - a \sum x}{n} \quad (56)$$

$$b = \frac{12634,49707 - 10,277(47,14134)}{11} = 1104,55$$

$$y = 10,277x + 1104,55 \quad (57)$$

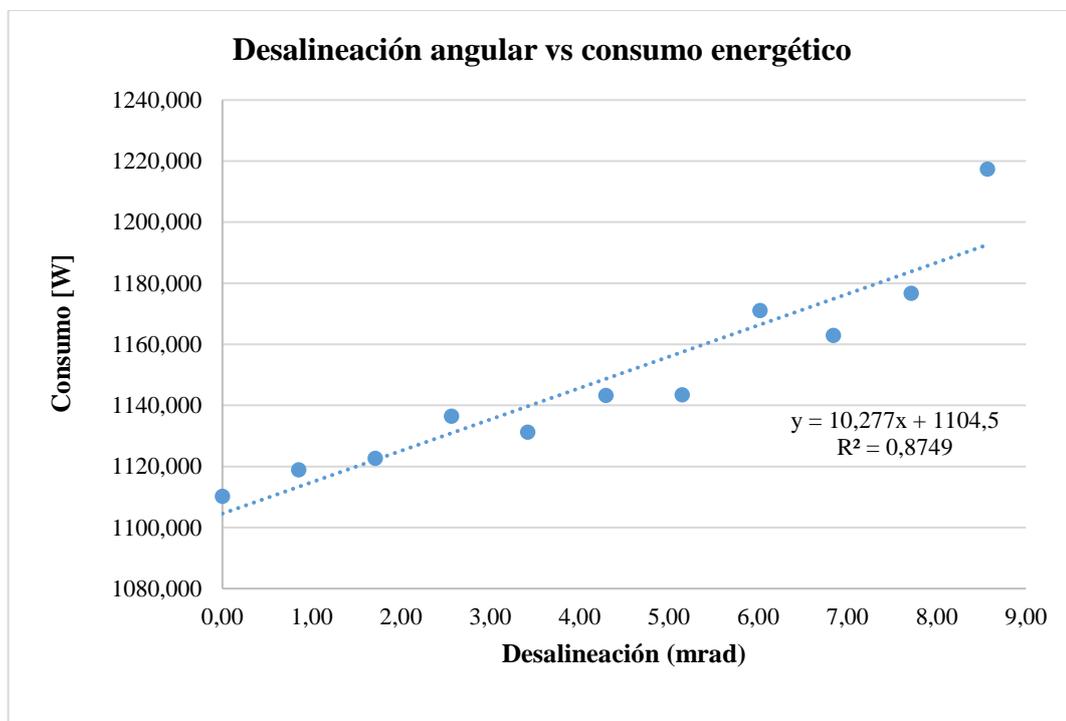


Figura 4-20. Gráfico de desalineación angular vs consumo energético

Fuente: Autores

4.4. Resultados con acople flexible de desalineación y consumo energético

Se realizó cinco repeticiones, cada repetición tuvo once niveles de desalineación (tratamientos), luego se calculó la media de cada nivel de desalineación, luego se validó con el estadístico r de Pearson.

4.4.1. Desalineación paralela vs consumo energético. Se presenta los siguientes resultados.

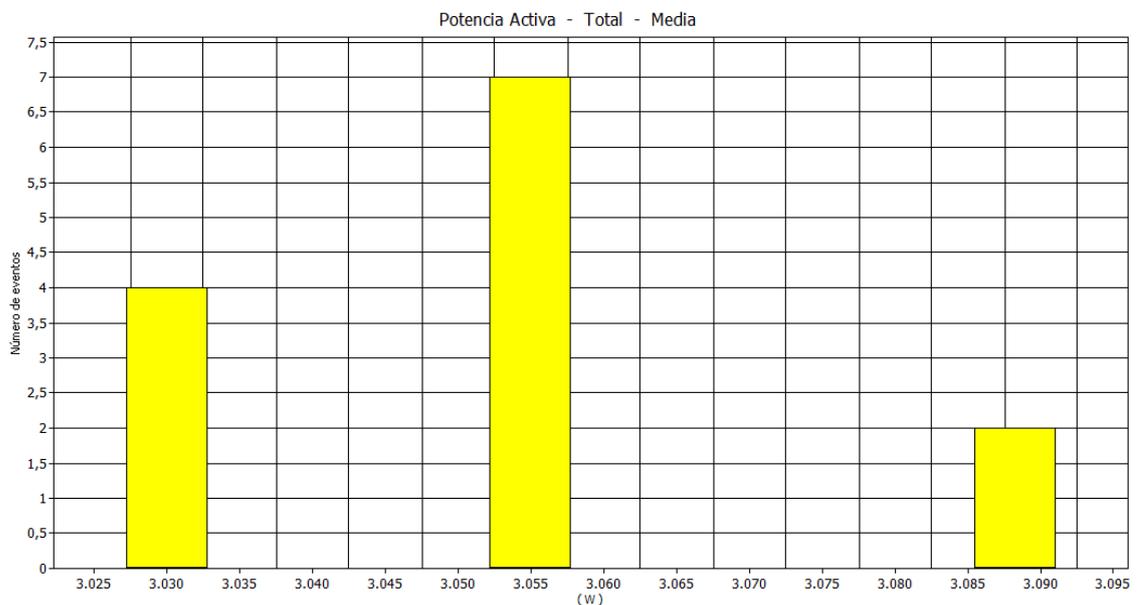


Figura 4-21. Fluctuación de la potencia activa en la desalineación paralela
Fuente: Autores

En la Figura 4-21 se observa que la toma de datos realizado con el analizador de calidad de la energía Fluke 435 II, la potencia activa se registró durante 2 minutos, para lo cual el módulo estuvo desalineado paralelamente y se usó un acople flexible, se mostró un valor máximo de 3090W, un valor mínimo de 3030W y un valor medio de 3055,38W este último mencionado fue el utilizado para el análisis de consumo energético.

Tabla 4-13. Valores de desalineación paralela vs consumo energético

Ítem	$x(mm)$	$y(W)$	$x * y$	x^2	y^2
1	0	1059,7548	0,0000	0,0000	1123080,2459
2	0,1	1073,7791	107,3779	0,0100	1153001,5093
3	0,2	1073,7899	214,7580	0,0400	1153024,7262
4	0,3	1073,8807	322,1642	0,0900	1153219,8404

Tabla 4-14. (Continua) Valores de desalineación paralela vs consumo energético

5	0,4	1071,8432	428,7373	0,1600	1148847,7992
6	0,5	1074,5765	537,2883	0,2500	1154714,7304
7	0,6	1074,8117	644,8870	0,3600	1155220,1238
8	0,7	1079,2424	755,4697	0,4900	1164764,1048
9	0,8	1082,1024	865,6819	0,6400	1170945,5075
10	0,9	1081,7719	973,5947	0,8100	1170230,4336
11	1,0	1084,7766	1084,7766	1,0000	1176740,1945
Sumatoria	5,5	11830,3291	5934,7355	3,8500	12723789,2159

Fuente: Autores

$$(\sum x)^2 = 30,2500$$

$$(\sum y)^2 = 139956686,2385$$

$$r = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{n(\sum x^2) - (\sum x)^2} \sqrt{n(\sum y^2) - (\sum y)^2}} \quad (58)$$

$$r = \frac{11(5934,7355) - (5,5000)(11830,3291)}{\sqrt{11(3,8500) - 30,2500} \sqrt{11(12723789,2159) - 139956686,2385}} = 0,87567$$

$$r^2 = 0,7668$$

$$a = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{n(\sum x^2) - (\sum x)^2} \quad (59)$$

$$a = \frac{11(5934,7355) - (5,5000)(11830,3291)}{11(3,8500) - 30,2500} = 17,792$$

$$b = \frac{\sum y - a \sum x}{n} \quad (60)$$

$$b = \frac{11830,3291 - 17,792(5,5000)}{11} = 1066,59$$

$$y = 17,792x + 1066,59 \quad (61)$$

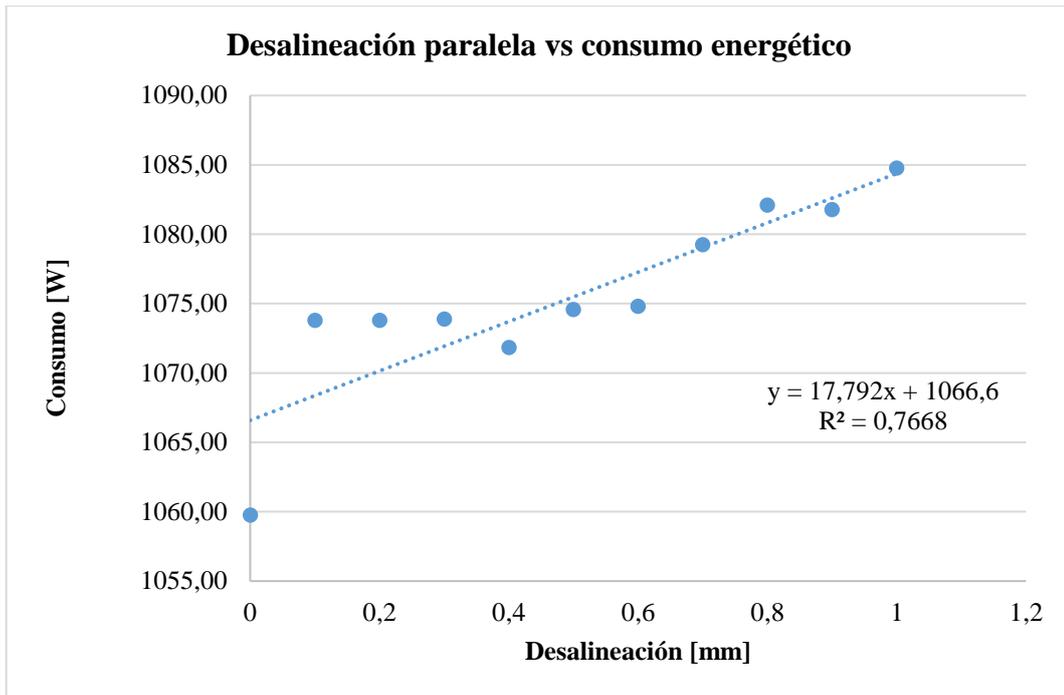


Figura 4-22. Gráfico de desalineación paralela vs consumo energético
Fuente: Autores

4.4.2. Desalineación angular vs consumo energético. Se presenta los siguientes resultados

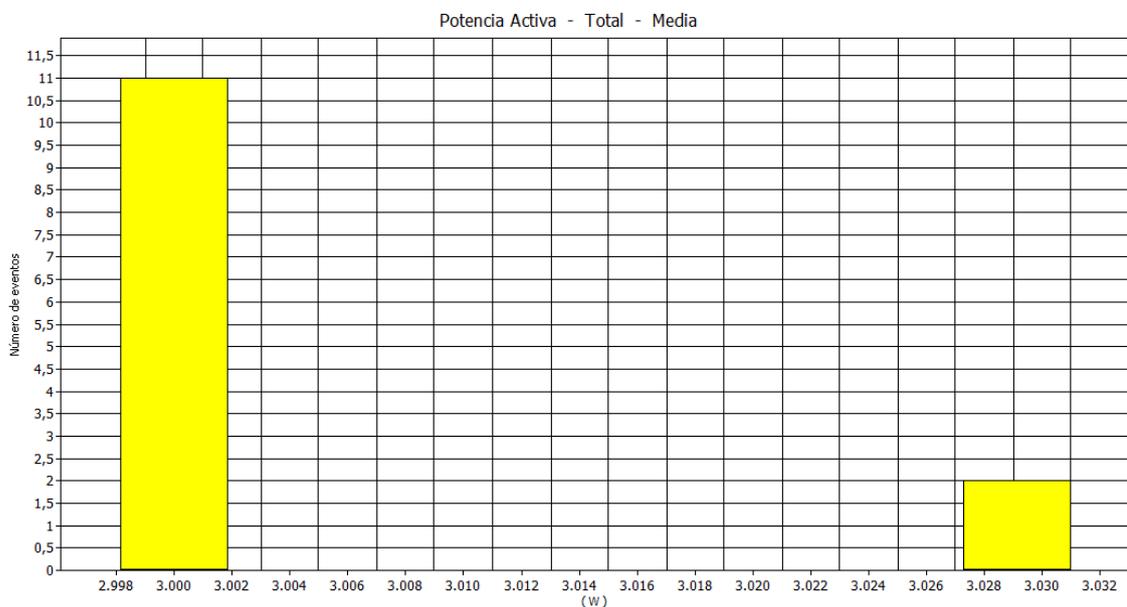


Figura 4-23. Fluctuación de la potencia activa en desalineación angular
Fuente: Autores

En la Figura 4-23 se observa que la toma de datos realizado con el analizador de calidad de la energía Fluke 435 II, la potencia activa se registró durante 2 minutos, para lo cual el módulo estuvo desalineado angularmente y se usó un acople flexible, se mostró un

valor máximo de 3030W, un valor mínimo de 3000W y un valor medio de 3004,62W este último mencionado fue el utilizado para el análisis de consumo energético.

Tabla 4-15. Valores de desalineación angular vs consumo energético

Ítem	x(mrad)	y (W)	x * y	x ²	y ²
1	0,00	1080,08225	0,00000	0,00000	1166577,65846
2	1,75	1081,38064	1887,36526	3,04617	1169384,08191
3	3,49	1082,25985	3777,79955	12,18470	1171286,38411
4	5,24	1081,46086	5662,51583	27,41557	1169557,59504
5	6,98	1084,30210	7569,85670	48,73879	1175711,04740
6	8,73	1088,39268	9498,01794	76,15435	1184598,63449
7	10,47	1087,40214	11387,24853	109,66227	1182443,40404
8	12,22	1088,33951	13296,57554	149,26254	1184482,89963
9	13,96	1090,14797	15221,33712	194,95515	1188422,59482
10	15,71	1096,40999	17222,36780	246,74011	1202114,85918
11	17,45	1102,64105	19244,71672	304,61742	1215817,27666
Sumatoria	95,99311	11962,81903	104767,80100	1172,77707	13010396,43574

Fuente: Autores

$$(\sum x)^2 = 9214,67695$$

$$(\sum y)^2 = 143109039,21902$$

$$r = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{n(\sum x^2) - (\sum x)^2} \sqrt{n(\sum y^2) - (\sum y)^2}} \quad (62)$$

$$r = \frac{11(104767,80100) - (95,99311)(11962,81903)}{\sqrt{11(1172,77707) - 9214,67695} \sqrt{13010396,43574 - 143109039,21902}}$$

$$r = 0,9252$$

$$r^2 = 0,8560$$

$$a = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{n(\sum x^2) - (\sum x)^2} \quad (63)$$

$$a = \frac{11(104767,80100) - (95,99311)(11962,81903)}{11(1172,77707) - 9214,67695} = 1,1117$$

$$b = \frac{\sum y - a \sum x}{n} \quad (64)$$

$$b = \frac{11962,81903 - 1,1117(95,99311)}{11} = 1077,83$$

$$y = 1,1117x + 1077,83 \quad (65)$$

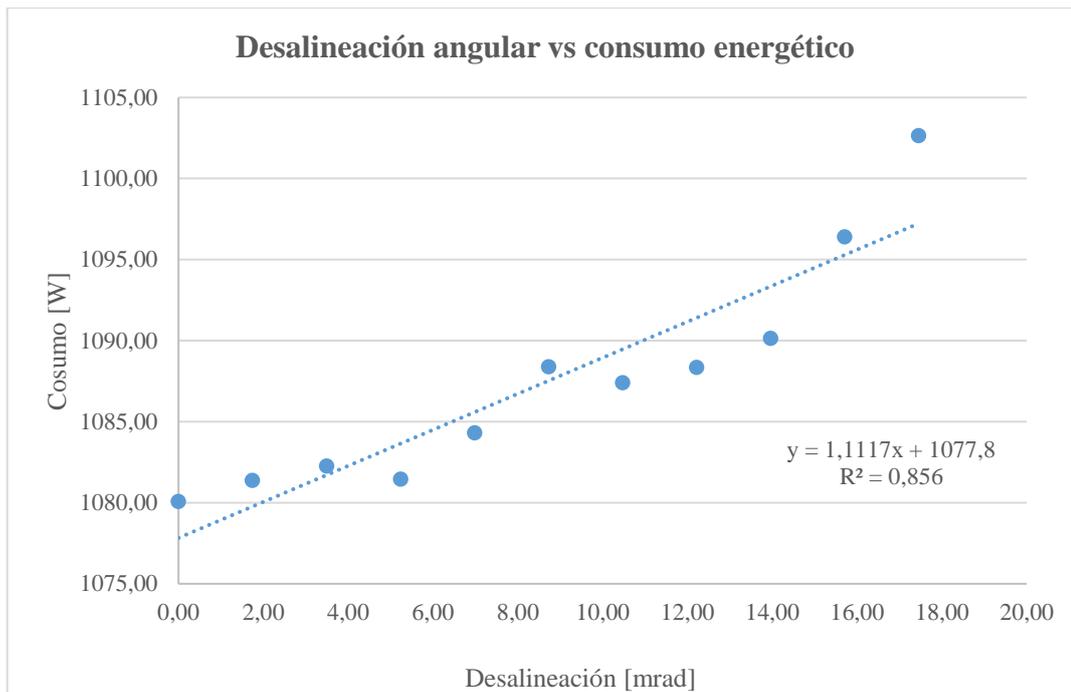


Figura 4-24. Gráfico de desalineación angular vs pérdidas de energía
Fuente: Autores

4.5. Interpretación y evaluación de resultados de vibraciones

Se presenta las ecuaciones de vibraciones medidas con acoplamientos rígido y flexible en las direcciones radial y axial.

Tabla 4-16. Resultado de vibraciones

Tipo de acople	Tipo de desalineación	Punto de Apoyo	Ecuación	Ubicación	Coefficiente de correlación (r) de Pearson
Rígido	Paralela	Vertical	$y = 1,1328x + 4,6116$	(21)	0,8880
		Axial	$y = 0,8158x + 2,6243$	(25)	0,9112
	Angular	Vertical	$y = 0,5887x + 4,4096$	(29)	0,97975
		Axial	$y = 1,1169x + 4,0734$	(33)	0,97227
Flexible	Paralela	Vertical	$y = 0,1123x + 0,6904$	(37)	0,9379
		Axial	$y = 0,0743x + 0,3901$	(41)	0,8281
	Angular	Vertical	$y = 0,0161x + 0,6960$	(45)	0,88602
		Axial	$y = 0,0253x + 0,4115$	(49)	0,91034

Fuente: Autores

Según las ecuaciones encontradas de desalineación paralela en la dirección radial vertical, tuvo mayor pendiente cuando se utilizó un acoplamiento rígido que un acoplamiento

flexible, por lo tanto, la vibración fue mayor para un mismo nivel de desalineación. Las ecuaciones de desalineación paralela en dirección axial, con un acoplamiento rígido la pendiente creció a medida que el nivel de desalineación era mayor, pero fue menor que en la dirección radial vertical, con un acoplamiento flexible el comportamiento fue similar que en un acoplamiento rígido, pero los niveles de vibración fueron menores.

Las ecuaciones de desalineación angular en dirección radial vertical, con acoplamiento rígido la pendiente fue menor que la unidad la cual creció a medida que el nivel de desalineación era mayor, con un acoplamiento flexible el comportamiento fue similar que con un acoplamiento rígido pero los niveles de vibración fueron menores. Las ecuaciones de desalineación angular en dirección axial, con acoplamiento rígido la pendiente es mayor que con acoplamiento flexible, lo que significa que la vibración es mayor para un mismo nivel de desalineación.

Si se tiene once pares ordenados de datos y un nivel de significancia del 1% entonces el coeficiente de correlación r de Pearson le corresponde un valor de 0,735, por lo tanto, si los coeficientes de correlación encontrados son mayores a 0,735 entonces se rechaza la hipótesis nula Ver Anexo N. (TRIOLA, 2009)

Hipótesis alternativa: El incremento de la vibración mecánica en los motores eléctricos trifásicos asincrónicos jaula de ardilla es función del nivel de desalineación entre el eje motriz y el acoplado.

Hipótesis nula: El incremento de la vibración mecánica en los motores eléctricos trifásicos asincrónicos jaula de ardilla no es función del nivel de desalineación entre el eje motriz y el acoplado

Por lo tanto, se rechazó la hipótesis nula y se aceptó la hipótesis alternativa, además el estadístico r de Pearson nos indicó que hubo una relación lineal entre las variables analizadas.

4.6. Interpretación y evaluación de resultados de consumo energético

Tabla 4-17. Resultados de consumo energético

Tipo de acople	Tipo de desalineación	Ecuación	Ubicación	Coefficiente de correlación (r) de Pearson
Rígido	Paralela	$y = 49,417x + 1085,8$	(53)	0,9714
	Angular	$y = 10,277x + 1104,55$	(57)	0,93536
Flexible	Paralela	$y = 17,792x + 1066,59$	(61)	0,87567
	Angular	$y = 1,1117x + 1077,83$	(65)	0,9252

Fuente: Autores

La ecuación encontrada en la desalineación paralela con un acoplamiento rígido obtuvo mayor pendiente y ordenada que con un acoplamiento flexible por ende el consumo energético también fue mayor. Lo mismo ocurrió con la desalineación angular.

Po lo tanto, hubo mayor consumo energético con un acopamiento rígido que con un acoplamiento flexible.

Si se tiene once pares ordenados de datos y un nivel de significancia del 1% entonces el coeficiente de correlación r de Pearson le corresponde un valor de 0,735, por lo tanto, si los coeficientes de correlación encontrados son mayores a 0,735 entonces se rechaza la hipótesis nula Ver Anexo N. (TRIOLA, 2009)

Hipótesis alternativa: El incremento del consumo energético en los motores eléctricos trifásicos asíncronos jaula de ardilla es función del nivel de desalineación entre el eje motriz y el acoplado.

Hipótesis nula: El incremento del consumo energético en los motores eléctricos trifásicos asíncronos jaula de ardilla no es función del nivel de desalineación entre el eje motriz y el acoplado

Por lo tanto, se rechazó la hipótesis nula y se aceptó la hipótesis alternativa, además el estadístico r de Pearson nos indicó que hubo una relación lineal entre las variables analizadas.

CAPITULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

5.1 Conclusiones

Se observó que las vibraciones mecánicas y consumo energético son mayores cuando se utilizó un acoplamiento rígido, por ende, el acoplamiento flexible absorbió las vibraciones mecánicas los cuales son utilizados en la mayoría de aplicaciones industriales.

A medida que el nivel de desalineación incrementa también lo hacen las vibraciones mecánicas y el consumo energético de forma lineal siendo útil para el análisis de pérdidas económicas en las industrias.

Con las ecuaciones encontradas se puede conocer de manera aproximada en nivel de vibraciones y consumo energético para sistema que trabajen en un contexto operacional similar al analizado en el presente trabajo.

Las ecuaciones de desalineación vs vibración mecánica, desalineación vs consumo energético se correlacionan de forma lineal según el estadístico r de Pearson siendo significativas al 1%.

5.2 Recomendaciones

Al sector industrial que utiliza sistemas de transmisión mediante acoples, deben planificar y programar tareas de mantenimiento, utilizando métodos de alineación mitigando incrementos de vibración y consumo energético.

Utilizar acoples flexibles en sistemas de transmisión ya que dichos acoples absorben las vibraciones reduciendo los posibles modos de fallas generadas por las mismas.

El conocimiento de las consecuencias de falla provocadas por la desalineación ayudará a la toma de decisiones en el sector industrial con el fin de mantener a los activos en óptimas condiciones y dentro de su contexto operacional mejorando así la eficiencia energética.

BIBLIOGRAFÍA

BANNISTER, Edgar. *Guía sobre el alineamiento de ejes en máquinas rotatorias, fundamentos y la tecnología laser.* [En línea] 2004. [Consultado: 29 de Octubre de 2017]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/305658139/Guia-de-Alineamiento-BANNISTER>.

BERNABÉ, Christian & ROCA, David. *Optaling Plus.* [En línea] 2017. [Consultado: 30 de Octubre de 2017]. Disponible en: <https://es.scribd.com/presentation/123784170/Teoria-Alineacion-ejes>.

BUN-CA, FUNDACIÓN RED DE ENERGÍA. *Manual técnico: Motores eléctricos.* [En línea] 2011. [Consultado: 25 de Julio de 2017]. ISBN: 978-9968-904-36-0. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/70000194/manual-tecnico-de-motores-electricos-1>

CENGEL, Yanus & BOLES, Michael. *Termodinámica.* 7^a ed. Mc Graw Hill. 2011, pp. 71-72.

COSTAS, Daniel. *Reloj comparador.* [En línea] 2017. [Consultado: 15 de Septiembre de 2017]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/322076778/Reloj-Comparador>

ENRÍQUEZ HARPER, Gilberto. *Guía práctica para el cálculo de instalaciones eléctricas.* [En línea] 2017. [Consultado: 11 de Noviembre de 2017.] Disponible en: <https://es.scribd.com/document/338675802/Guia-Practica-para-el-Calculo-de-Instalaciones-Elctricas-Gilberto-Enriquez-Harper-pdf>.

ESHLEMAN, Ronald L. *Vibraciones Básicas de Máquinas.* Estados Unidos : [En línea] 2017. [Consultado: 10 de Noviembre de 2017]. ISBN 0-9669500-1-1. Disponible en: <https://es.slideshare.net/ferrita/01-vibraciones-basicasdemaquinaslibre>

INGENIERIA, SINAIS. *Fundamentos del análisis de vibraciones.* [En línea] 2010. [Consultado: 15 de Octubre de 2017]. Disponible en: [http://www.sinais.es/Recursos/Cursos-o-vibraciones/fundamentos/fundamentos_vibraciones.html](http://www.sinais.es/Recursos/Cursos-vibraciones/fundamentos/fundamentos_vibraciones.html)

ISO50001:2011. *Sistemas de gestión energética.*

MINISTERIO DE ELECTRICIDAD Y ENERGÍAS RENOVABLES, MEER. *Plan Nacional de Eficiencia Energética 2016-2035.* Manthra Comunicación. Quito, Ecuador , 2016. [Consultado: 15 de Noviembre de 2017.] ISBN: 978-9942-22-148-3. Disponible en: <http://www.energia.gob.ec/biblioteca/>

MTS, ANSI/NETA. *Estándar para las especificaciones de prueba de mantenimiento.* [En línea] 2011. [Consultado: 11 de Noviembre de 2017.] Disponible en: <http://www.iemworldwide.com/pdf/ansi-neta-mts-2011.pdf>

NIÑO B, Jesús Armando. *Manual moderno sobre alineamiento de ejes de maquinaria.* Bogota, Colombia. [En línea]1996. [Consultado: 16 de Noviembre de 2017.] Disponible en: <https://es.scribd.com/doc/28283823/Manual-Moderno-de-alineamiento-de-Ejes>

NOVA, David. *UNE EN ISO 50001. Sistemas de Gestión de la Energía.* [En línea] 2016. [Consultado: 22 de Septiembre de 2017]. Disponible en: http://www.atecyr.org/eATECYR/area_tecnica/ficheros/ponencias/Presentacion%20ISO%2050001.pdf

POLOMINO MARIN, Evelio. *Elementos de medición y análisis de vibraciones en máquinas rotatorias.* 5ª ed. La Habana. [En línea] 2007. [Consultado: 25 de Septiembre de 2017]. ISBN 959-261-043-6. Disponible en: <https://es.scribd.com/doc/46228543/Elementos-de-medicion-y-analisis-de-vibraciones-mecanica-enmaquinas-rotatorias>

PRÜFTECHNIK. *Alinear ejes.* [En línea] 2017. [Consultado: 01 de Noviembre de 2017]. Disponible en: <https://www.pruftechnik.com/es/soluciones/aplicaciones/alinear-ejes.html#c15931>.

SÁNCHEZ MARÍN, Francisco T, y otros. 2007. *Mantenimiento mecánico de máquinas.* 2ª ed. Castelló de la Plana : Publicacions de la Universitat Jaume I, D. L, 2007. pág. 389. ISBN 978-84-8021-629-6.

SERRA, Jordi. *Guía Técnica de eficiencia energética eléctrica.* [En línea] 2009. [Consultado: 11 de Octubre de 2017]. ISBN-13: 978-84-612-0421-2. Disponible en: http://circuitor.com/docs/GUIA_EEE_SP-LR.pdf

SKF. *Chapas calibradas* [En línea] 2017. [Consultado: 30 de Octubre de 2017]. Disponible en: <http://www.skf.com/co/products/maintenance-products/alignment-tools/shims/index.html>

TRIOLA, Mario F. *Estadística.* 10ª ed. México: Pearson, 2009. ISBN: 978-970-26-1287-2, pp. 517-523

WEG. *Guía de Especificación de Motores Eléctricos.* [En línea] 2014. [Consultado: 22 de Agosto de 2017]. Disponible en: <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-guia-de-especificacion-50039910-manual-espanol.pdf>

WHITE, Glen. *Introducción al Análisis de Vibraciones.* México : Azima DLI, 2010, pp. 109-111.