



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE MECÁNICA

CARRERA MANTENIMIENTO INDUSTRIAL

**“COMPARACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO DE LA
DESALINEACIÓN DE EJES CON DIFERENTES ACOPLES
FLEXIBLES UTILIZANDO REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE”**

Trabajo de Integración Curricular

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO EN MANTENIMIENTO INDUSTRIAL

AUTORES:

SHAHI RANCIE GRANDA LOGROÑO

JUAN GABRIEL NAULA MONTALEZA

Riobamba – Ecuador

2022



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE MECÁNICA

CARRERA MANTENIMIENTO INDUSTRIAL

**“COMPARACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO DE LA
DESALINEACIÓN DE EJES CON DIFERENTES ACOPLES
FLEXIBLES UTILIZANDO REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE”**

Trabajo de Integración Curricular

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO EN MANTENIMIENTO INDUSTRIAL

AUTORES: SHAHI RANCIE GRANDA LOGROÑO

JUAN GABRIEL NAULA MONTALEZA

DIRECTOR: Ing. EDUARDO SEGUNDO HERNÁNDEZ DÁVILA

Riobamba – Ecuador

2022

© 2022, Shahi Rancie Granda Logroño & Juan Gabriel Naula Montaleza.

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Nosotros, Shahi Rancie Granda Logroño y Juan Gabriel Naula Montaleza, declaramos que el presente trabajo de integración curricular es de nuestra autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autores asumimos la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de integración curricular; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 12 de mayo de 2022



Shahi Rancie Granda Logroño
C.I.: 060388336-4



Juan Gabriel Naula Montaleza
C.I.: 060573839-2

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE MECÁNICA
CARRERA MANTENIMIENTO INDUSTRIAL

El Tribunal del Trabajo de Integración Curricular certifica que: El Trabajo de Integración Curricular; Tipo: Proyecto de Investigación, **COMPARACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO DE LA DESALINEACIÓN DE EJES CON DIFERENTES ACOPLÉS FLEXIBLES UTILIZANDO REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE**, realizado por los señores: **SHAHI RANCIE GRANDA LOGROÑO Y JUAN GABRIEL NAULA MONTALEZA**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal autoriza su presentación.

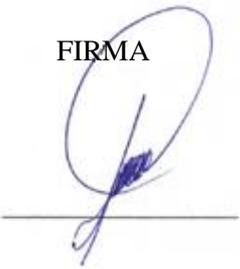
	FIRMA	FECHA
Ing. Marco Antonio Ordóñez Viñán PRESIDENTE DEL TRIBUNAL		2022-05-12
Ing. Eduardo Segundo Hernández Dávila DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR		2022-05-12
Ing. Félix Antonio García Mora MIEMBRO DEL TRIBUNAL		2022-05-12

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	xi
ÍNDICE DE ANEXOS	xiii
ÍNDICE DE ABREVIATURAS.....	xiv
RESUMEN.....	xv
SUMMARY	xvi
INTRODUCCIÓN	1

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL.....	2
1.1. Antecedentes.....	2
1.2. Definición del problema	3
1.3. Justificación e importancia	3
1.4. Objetivos.....	4
1.4.1. <i>Objetivo general</i>	4
1.4.2. <i>Objetivos específicos</i>	4
1.5. Hipótesis	5
1.5.1. <i>Variable dependiente</i>	5
1.5.2. <i>Variables independientes</i>	5
1.6. Términos estadísticos	5
1.6.1. <i>Población</i>	5
1.6.2. <i>Muestra</i>	6
1.6.3. <i>Tamaño de la muestra</i>	6
1.6.4. <i>Recolección de datos</i>	6
1.7. Desalineación.....	7
1.7.1. <i>Causas de la desalineación</i>	7
1.7.2. <i>Consecuencias de la desalineación</i>	8
1.7.3. <i>Objetivos de la alineación de ejes</i>	10
1.8. Tipos de desalineación.....	10
1.8.1. <i>Desalineación paralela</i>	11
1.8.2. <i>Desalineación angular</i>	11

1.8.3.	<i>Desalineación combinada</i>	12
1.9.	Acoples flexibles	12
1.9.1.	<i>Acoples de mandíbula</i>	12
1.9.2.	<i>Acoples con cubierta de poliuretano</i>	13
1.9.3.	<i>Acoples tipo dona</i>	13
1.10.	Matriz energética del Ecuador	14
1.11.	Consumo energético	15
1.11.1.	<i>Situación del consumo energético</i>	15
1.11.2.	<i>Energía eléctrica</i>	16
1.11.3.	<i>Gestión de la energía</i>	16
1.11.4.	<i>Gestión de la energía eléctrica</i>	17
1.11.5.	<i>Eficiencia energética</i>	17
1.11.5.1.	<i>Eficiencia energética eléctrica</i>	18
1.11.5.2.	<i>Diagnóstico de la energía eléctrica</i>	19
1.12.	Termografía	20
1.12.1.	<i>Características principales de las cámaras termográficas</i>	21
1.12.2.	<i>Aplicaciones de la termografía</i>	21
1.12.2.1.	<i>Detección de conexiones eléctricas sueltas o con corrosión</i>	21
1.12.2.2.	<i>Detección de desequilibrios y sobrecargas eléctricas</i>	21
1.13.	Análisis de vibraciones	21
1.13.1.	<i>Vibración</i>	22
1.13.2.	<i>Vibración simple</i>	22
1.13.3.	<i>Vibración compuesta</i>	22
1.13.4.	<i>La transformada rápida de Fourier (FFT)</i>	22
1.13.5.	<i>Sentidos principales de medición</i>	23
1.14.	Modelos de regresión	23
1.14.1.	<i>Regresión lineal múltiple</i>	23
1.14.2.	<i>Condiciones de la regresión lineal múltiple</i>	24
1.14.2.1.	<i>Multicolinealidad</i>	24
1.14.2.2.	<i>Parsimonia</i>	24
1.14.2.3.	<i>Relación lineal entre los predictores numéricos y la variable respuesta</i>	24

CAPÍTULO II

2.	MARCO METODOLÓGICO	26
2.1.	Análisis de la necesidad del módulo	26

2.1.1.	<i>Características del módulo</i>	26
2.1.2.	<i>Necesidades del módulo</i>	27
2.2.	Adaptación del módulo de pruebas	28
2.2.1.	<i>Cambio de terminales y borneras en el tablero de control</i>	28
2.2.2.	<i>Cambio de tornillería del módulo</i>	28
2.2.3.	<i>Ajuste de tornillería del módulo</i>	29
2.2.4.	<i>Reparación del paro de emergencia</i>	29
2.2.5.	<i>Reparación de los calentadores monofásicos</i>	29
2.2.6.	<i>Aplicación de la pintura en los puntos de medición de termografía</i>	30
2.3.	Equipos necesarios	31
2.3.1.	<i>Analizador de la calidad de la energía</i>	31
2.3.1.1.	<i>Programación del equipo</i>	31
2.3.1.2.	<i>Recopilación de datos</i>	31
2.3.1.3.	<i>Descargar los datos de las mediciones en el equipo</i>	32
2.3.2.	<i>Alineador láser de ejes</i>	32
2.3.2.1.	<i>Colocación del equipo y proceso para obtener los datos de desalineación</i>	32
2.3.3.	<i>Analizador de vibraciones</i>	33
2.3.3.1.	<i>Proceso para realizar la medición de la frecuencia natural</i>	33
2.3.3.2.	<i>Programación y generación de la ruta</i>	33
2.3.3.3.	<i>Proceso para cargar la ruta al equipo</i>	34
2.3.3.4.	<i>Proceso para realizar la medición de la ruta</i>	34
2.3.3.5.	<i>Proceso para descargar los datos registrados en la ruta</i>	34
2.3.4.	<i>Cámara termográfica</i>	34
2.4.	Pruebas preliminares	35
2.4.1.	<i>Condiciones a considerar al realizar las pruebas</i>	35
2.4.2.	<i>Carga suministrada al sistema de generación</i>	35
2.4.3.	<i>Estandarización de valores de desalineación obtenidos con el alineador láser</i>	36
2.4.4.	<i>Frecuencia natural del equipo</i>	37
2.4.5.	<i>Temperatura de los elementos con el equipo alineado</i>	41
2.5.	Obtención de valores de desalineamiento y consumo energético	43
2.5.1.	<i>Cálculo del tamaño de la muestra</i>	43
2.5.1.1.	<i>Cálculo del tamaño de la muestra en las mediciones de calidad de la energía</i>	43
2.6.	Aplicación del método de regresión lineal múltiple	45

CAPÍTULO III

3.	RESULTADOS	46
3.1.	Realizar la regresión lineal múltiple para cada uno de los tipos de acoples flexibles utilizados.....	46
3.1.1.	<i>Regresión lineal múltiple del acople tipo mandíbula</i>	46
3.1.1.1.	<i>Desalineación paralela.....</i>	46
3.1.1.2.	<i>Desalineación angular</i>	48
3.1.1.3.	<i>Desalineación combinada</i>	50
3.1.2.	<i>Regresión lineal múltiple del acople tipo dona</i>	54
3.1.2.1.	<i>Desalineación paralela.....</i>	54
3.1.2.2.	<i>Desalineación angular</i>	56
3.1.2.3.	<i>Desalineación combinada</i>	58
3.1.3.	<i>Regresión lineal múltiple del acople con cubierta de poliuretano</i>	62
3.1.3.1.	<i>Desalineación paralela.....</i>	62
3.1.3.2.	<i>Desalineación angular</i>	64
3.1.3.3.	<i>Desalineación combinada</i>	67
3.2.	Analizar los resultados obtenidos de la regresión lineal múltiple	71
3.2.1.	<i>Comparación de los resultados obtenidos de la desalineación paralela</i>	71
3.2.2.	<i>Comparación de los resultados obtenidos de la desalineación angular</i>	71
3.2.3.	<i>Comparación de los resultados obtenidos de la desalineación combinada</i>	72
3.3.	Comparación del costo de adquisición de los tres tipos de acoples	73
3.4.	Analizar los resultados obtenidos por termografía en los diferentes acoples.....	75
3.4.1.	<i>Acople tipo mandíbula</i>	75
3.4.2.	<i>Acople tipo dona</i>	77
3.4.3.	<i>Acople con cubierta de poliuretano.....</i>	79
3.5.	Comparación de los resultados obtenidos mediante termografía	81
3.5.1.	<i>Desalineación paralela</i>	81
3.5.2.	<i>Desalineación angular.....</i>	82
3.5.3.	<i>Desalineación combinada.....</i>	83
3.6.	Comparación del incremento del consumo energético vs desalineación.....	84
	CONCLUSIONES.....	87
	RECOMENDACIONES.....	88
	BIBLIOGRAFÍA	
	ANEXOS	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-2: Valores obtenidos con el alineador de ejes láser Optaling Plus	36
Tabla 2-2: Tolerancias obtenidas en los diferentes puntos de desalineación.....	37
Tabla 3-2: Resumen de los valores obtenidos de las frecuencias naturales	41
Tabla 4-2: Temperatura en puntos de medición del acople tipo mandíbula alineado	42
Tabla 5-2: Temperatura en puntos de medición del acople tipo dona	42
Tabla 6-2: Temperatura en puntos de medición del acople con cubierta de poliuretano	43
Tabla 7-2: Mediciones de potencia activa con el equipo alineado.....	44
Tabla 1-3: Valores de desalineación paralela, vibraciones y consumo energético del AtM....	47
Tabla 2-3: Valores de coeficientes de regresión desalineación paralela.....	47
Tabla 3-3: Valores de desalineación angular, vibraciones y consumo energético del AtM	49
Tabla 4-3: Valores de coeficientes de regresión desalineación angular.....	49
Tabla 5-3: Valores de desalineación combinada, vibraciones y consumo energético del AtM52	
Tabla 6-3: Valores de coeficientes de regresión desalineación combinada, relación D vs P...	52
Tabla 7-3: Valores de coeficientes de regresión desalineación combinada, relación V vs P...	53
Tabla 8-3: Valores de desalineación paralela, vibraciones y consumo energético del AtD	55
Tabla 9-3: Valores de coeficientes de regresión desalineación paralela.....	55
Tabla 10-3: Valores de desalineación angular, vibraciones y consumo energético del AtD	57
Tabla 11-3: Valores de coeficientes de regresión desalineación angular.....	57
Tabla 12-3: Valores de desalineación combinada, vibraciones y consumo energético del AtD	60
Tabla 13-3: Valores de coeficientes de regresión desalineación combinada, relación D vs P...	60
Tabla 14-3: Valores de coeficientes de regresión desalineación combinada, relación V vs P...	61
Tabla 15-3: Valores de desalineación paralela, vibraciones y consumo energético del ACP....	63
Tabla 16-3: Valores de coeficientes de regresión desalineación paralela.....	64
Tabla 17-3: Valores de desalineación angular, vibraciones y consumo energético del ACP	65
Tabla 18-3: Valores de coeficientes de regresión desalineación angular.....	66
Tabla 19-3: Valores de desalineación combinada, vibraciones y consumo energético del ACP68	
Tabla 20-3: Valores de coeficientes de regresión desalineación combinada, relación D vs P...	69
Tabla 21-3: Valores de coeficientes de regresión desalineación combinada, relación V vs P...	70
Tabla 22-3: Costo de adquisición Acople tipo mandíbula.....	73
Tabla 23-3: Costo de adquisición Acople tipo dona.....	74
Tabla 24-3: Costo de adquisición Acople con cubierta de poliuretano.....	74
Tabla 25-3: Temperaturas obtenidas utilizando el AtM con desalineación paralela	75
Tabla 26-3: Temperaturas obtenidas utilizando el AtM con desalineación angular	76

Tabla 27-3: Temperaturas obtenidas utilizando el AtM con desalineación combinada	76
Tabla 28-3: Temperaturas obtenidas utilizando el AtM con las diferentes desalineaciones.....	76
Tabla 29-3: Variación de temperatura: tipos de desalineación - equipo alineado con el AtM ..	77
Tabla 30-3: Temperaturas obtenidas utilizando el AtD con desalineación paralela	77
Tabla 31-3: Temperaturas obtenidas utilizando el AtD con desalineación angular.....	78
Tabla 32-3: Temperaturas obtenidas utilizando el AtD con desalineación combinada	78
Tabla 33-3: Temperaturas obtenidas utilizando el AtD con las diferentes desalineaciones	79
Tabla 34-3: Variación de temperatura: tipos de desalineación - equipo alineado con el AtD ...	79
Tabla 35-3: Temperaturas obtenidas utilizando el ACP con desalineación paralela	80
Tabla 36-3: Temperaturas obtenidas utilizando el ACP con desalineación angular	80
Tabla 37-3: Temperaturas obtenidas utilizando el ACP con desalineación combinada	80
Tabla 38-3: Temperaturas obtenidas utilizando el ACP con las diferentes desalineaciones	81
Tabla 39-3: Variación de temperatura: tipos de desalineación - equipo alineado con el ACP ..	81
Tabla 40-3: Variación de temperatura para desalineación paralela	82
Tabla 41-3: Variación de temperatura para desalineación angular	83
Tabla 42-3: Variación de temperatura para desalineación combinada	84

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1: Desalineación en conjunto de bombeo.....	7
Figura 2-1: Efectos de la desalineación en acoples flexibles.....	9
Figura 3-1: Desalineación paralela	11
Figura 4-1: Desalineación angular.....	11
Figura 5-1: Acople tipo Mandíbula	12
Figura 6-1: Acople tipo Cubierta de Poliuretano	13
Figura 7-1: Acople tipo Dona	13
Figura 8-1: Termografía de rodamiento.....	20
Figura 9-1: Señal en el dominio de frecuencia y en el dominio del tiempo	23
Figura 1-2: Componentes del módulo de generación monofásico.....	26
Figura 2-2: Tablero de control del módulo de generación monofásico	28
Figura 3-2: Tornillería antigua vs tornillería nueva.....	28
Figura 4-2: Ajuste de la tornillería del generador.....	29
Figura 5-2: Reparación del paro de emergencia	29
Figura 6-2: Reparación de los calefactores.....	30
Figura 7-2: Zonas en las que se va a medir la temperatura.....	30
Figura 8-2: Proceso de pintado de zonas de medición.....	30

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1-1:	Relación entre la desalineación y la vida útil de un rodamiento	8
Gráfico 2-1:	Relación entre desalineación y vida útil de sellos mecánicos	9
Gráfico 3-1:	Relación entre la desalineación y el consumo energético	10
Gráfico 4-1:	Producción energética primaria año 2015	14
Gráfico 5-1:	Demanda de energía por sector, año 2015.....	15
Gráfico 6-1:	Situación del consumo energético a nivel mundial	16
Gráfico 1-2:	Frecuencia natural LVM	38
Gráfico 2-2:	Frecuencia natural LHM	38
Gráfico 3-2:	Frecuencia natural LAM	39
Gráfico 4-2:	Frecuencia natural LVG	39
Gráfico 5-2:	Frecuencia natural LHG	40
Gráfico 6-2:	Frecuencia natural LAG	40
Gráfico 1-3:	Armónicos presentes en la desalineación paralela del AtM en el LHM	46
Gráfico 2-3:	Correlación variables independientes en desalineación paralela AtM	48
Gráfico 3-3:	Armónicos presentes en la desalineación angular del AtM en el LAG.....	48
Gráfico 4-3:	Correlación variables independientes en desalineación angular AtM.....	50
Gráfico 5-3:	Armónicos presentes en la desalineación combinada del AtM en el LHM.....	50
Gráfico 6-3:	Armónicos presentes en la desalineación combinada del AtM en el LAG	51
Gráfico 7-3:	Correlación variables independientes D_p vs D_A en el AtM.....	53
Gráfico 8-3:	Correlación variables independientes V_{LHM} vs V_{LAG} en el AtM	54
Gráfico 9-3:	Armónicos presentes en la desalineación paralela del AtD en el LHG.....	54
Gráfico 10-3:	Correlación variables independientes en desalineación paralela AtD.....	56
Gráfico 11-3:	Armónicos presentes en la desalineación angular del AtD en el LAG.....	56
Gráfico 12-3:	Correlación variables independientes en desalineación angular AtD.....	58
Gráfico 13-3:	Armónicos presentes en la desalineación combinada del AtD en el LHG	59
Gráfico 14-3:	Armónicos presentes en la desalineación combinada del AtD en el LAM	59
Gráfico 15-3:	Correlación variables independientes D_p vs D_A en el AtD.....	61
Gráfico 16-3:	Correlación variables independientes V_{LHM} vs V_{LAG} en el AtD	62
Gráfico 17-3:	Armónicos presentes en la desalineación paralela del ACP en el LHG	63
Gráfico 18-3:	Correlación variables independientes en desalineación paralela ACP	64
Gráfico 19-3:	Armónicos presentes en la desalineación angular del ACP en el LAG.....	65
Gráfico 20-3:	Correlación variables independientes en desalineación angular ACP.....	66
Gráfico 21-3:	Armónicos presentes en la desalineación combinada del ACP en el LHG	67

Gráfico 22-3: Armónicos presentes en la desalineación combinada del ACP en el LAG	68
Gráfico 23-3: Correlación variables independientes D_p vs D_A en el ACP	69
Gráfico 24-3: Correlación variables independientes V_{LHM} vs V_{LAG} en el ACP	70
Gráfico 25-3: Consumo energético en función de la desalineación paralela	71
Gráfico 26-3: Consumo energético en función de la desalineación angular	72
Gráfico 27-3: Consumo energético en función de la desalineación combinada	73
Gráfico 28-3: Consumo energético vs desalineación en motores eléctricos	85
Gráfico 29-3: Consumo energético vs desalineación con el AtM.....	85
Gráfico 30-3: Consumo energético vs desalineación con el AtD	85
Gráfico 31-3: Consumo energético vs desalineación con el ACP	86

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: TERMOGRAFÍA ACOPLÉ MANDÍBULA ALINEADO

ANEXO B: TERMOGRAFÍA ACOPLÉ TIPO DONA ALINEADO

ANEXO C: TERMOGRAFÍA ACP ALINEADO

ANEXO D: CÓDIGO REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE

ANEXO E: CÓDIGO CONSUMO ENERGÉTICO - DESALINEACIÓN PARALELA

ANEXO F: CÓDIGO CONSUMO ENERGÉTICO - DESALINEACIÓN ANGULAR

ANEXO G: CÓDIGO CONSUMO ENERGÉTICO - DESALINEACIÓN COMBINADA

ANEXO H: TERMOGRAFÍA AtM DESALINEACIÓN PARALELA

ANEXO I: TERMOGRAFÍA AtM DESALINEACIÓN ANGULAR

ANEXO J: TERMOGRAFÍA AtM DESALINEACIÓN COMBINADA

ANEXO K: TERMOGRAFÍA AtD DESALINEACIÓN PARALELA

ANEXO L: TERMOGRAFÍA AtD DESALINEACIÓN ANGULAR

ANEXO M: TERMOGRAFÍA AtD DESALINEACIÓN COMBINADA

ANEXO N: TERMOGRAFÍA ACP DESALINEACIÓN PARALELA

ANEXO O: TERMOGRAFÍA ACP DESALINEACIÓN ANGULAR

ANEXO P: TERMOGRAFÍA ACP DESALINEACIÓN COMBINADA

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

RMS:	Raíz Cuadrática Media
LAG:	Lado Axial Generador
LHG:	Lado Horizontal Generador
LVG:	Lado Vertical Generador
LAM:	Lado Axial Motor
LHM:	Lado Horizontal Motor
LVM:	Lado Vertical Motor
VTV:	Valor Total de Vibraciones
AtD:	Acople Tipo Dona
AtM:	Acople Tipo Mandíbula
ACP:	Acople con Cubierta de Poliuretano
D:	Desalineación
V:	Velocidad
P:	Potencia

RESUMEN

El objetivo general fue relacionar la variación del consumo energético producto de la desalineación de ejes paralela y de la desalineación de ejes angular con el acople tipo mandíbula, el acople tipo dona y el acople con cubierta de poliuretano, utilizando regresión lineal múltiple. El tamaño muestral se lo definió utilizando la ecuación probabilística para una población infinita obteniendo un $n=12$. La técnica de recolección de datos fue asistida por un equipo de alineación láser y otro de análisis de la calidad de la energía eléctrica. Se realizó una observación de laboratorio a través de un módulo que permite forzar la desalineación y aplicarla a los distintos tipos de acoples. Se observó el incremento de consumo energético medido en Watts de un motor trifásico de 5 HP, sometido a una carga de 2,974 kW que representó el 80,38% de su capacidad, a medida que se desalineó de manera paralela, angular y combinada. En conclusión, el motor al utilizar el acople tipo mandíbula, como elemento de transmisión de movimiento, presentó un consumo energético medio de 3 kW con un incremento del mismo de 26 W, en condiciones de desalineación paralela, de igual manera presentó un consumo energético medio de 2,982 kW con un incremento de 8 W, en condiciones de desalineación angular, así mismo presentó un consumo energético medio de 3,003 kW con un incremento de 29 W, en condiciones de desalineación combinada. Se recomienda realizar una investigación de la vida útil para el acople con cubierta de poliuretano y para el acople tipo dona de igual manera desarrollar una comparación utilizando un acople de tipo magnético, uno de tipo electromagnético y uno de tipo neumático.

Palabras clave: < EFICIENCIA ENERGÉTICA>, < DESALINEACIÓN PARALELA>, < DESALINEACIÓN ANGULAR>, < CONSUMO ENERGÉTICO>, < ACOPLER FLEXIBLES>.

BRA-UTP-2022



SUMMARY

The general objective of this research work was to relate the variation in energy consumption due to parallel shaft misalignment and angular shaft misalignment with the jaw coupling, the donut-coupling and the Polyurethane-sheathed coupling, using multiple linear regression. The sample size was defined using the probabilistic equation for an infinite population, obtaining $n=12$. The data collection technique was assisted by a laser alignment equipment and another for analysis of the quality of electrical energy. A laboratory observation was made through a module that allows misalignment to be forced and applied to the different types of couplings. The increase in energy consumption measured in Watts of a 5 HP three-phase motor, subjected to a load of 2,974 kW that represented 80.38% of its capacity, was observed. As it was misaligned in a parallel, angular and combined manner. In conclusion, the motor using the jaw coupling, as a movement transmission element. It presented an average energy consumption of 3 kW with an increase of 26 W, in conditions of parallel misalignment. Likewise, it presented an average energy consumption of 2,982 kW with an increase of 8 W, in conditions of angular misalignment. Similarly, it presented an average energy consumption of 3,003 kW with an increase of 29 W, in conditions of combined misalignment. It is recommended to carry out a research of the service life for the coupling with a polyurethane-sheathed and for the donut coupling in the same manner to develop a comparison using a magnetic type coupling, an electromagnetic type coupling and a pneumatic type coupling.

Keywords: <ENERGY EFFICIENCY>, <PARALLEL MISALIGNMENT>, <ANGULAR MISALIGNMENT>, <ENERGY CONSUMPTION>, <FLEXIBLE COUPLINGS>.



Sandra Paulina Porras Pumalema

C.I. 0603357062

INTRODUCCIÓN

La desalineación presente en equipos rotativos genera daños a los componentes de los mismos, a la producción y un incremento del consumo de energía eléctrica. Debido a esto se utilizan diferentes métodos y equipos que permiten realizar la alineación de las máquinas, considerando un margen de tolerancia en cuanto a desalineación.

Actualmente, al realizar una alineación ésta debe estar bajo los niveles de tolerancia, sin tomar en cuenta que la desalineación por más mínima que ésta sea genera un incremento del consumo energético de los equipos, además que no se toma en cuenta que los acoples utilizados son diferentes para cada máquina o proceso.

Por lo cual, se realiza la presente investigación con la finalidad de proponer una ecuación para cada uno de los tres tipos de acoples flexibles utilizados, que permita cuantificar la relación entre la desalineación paralela, la desalineación angular y el consumo energético de manera precisa.

En aplicaciones prácticas la desalineación está presente de manera compuesta o combinada en los planos horizontal y vertical siendo necesario el análisis de más de una variable independiente a la vez, uno de los modelos matemáticos que permite dicha acción es la regresión lineal múltiple.

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

1.1. Antecedentes

Dentro de la última década el Ecuador ha realizado planes de sustentabilidad y sostenibilidad ambiental, dentro de las que se ha tomado una gran importancia la eficiencia energética en las industrias y los métodos para reducir el consumo energético total de estas, gracias a esto se han desarrollado diferentes investigaciones que relacionan la desalineación paralela, desalineación angular o la desalineación combinada en equipos rotativos con un incremento del consumo energético de dichos equipos.

Dentro de los laboratorios de la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo se han realizado diferentes investigaciones como:

El desarrollo de estándares de tolerancia de desalineamiento y consumo energético en motores eléctricos; su objetivo es obtener los estándares de tolerancias con un desalineamiento angular y paralelo por separado, y conocer el incremento de consumo energético causado por la desalineación; entre las recomendaciones de este estudio se encuentran enfocarse en el uso diferentes tipos de acoples para evaluar cómo se reacciona la desalineación y el consumo energético (Lagla y Lanche, 2016: pp.1-2).

El método de valoración energética en función de la severidad de la desalineación mediante el análisis de vibraciones y la calidad de la energía; su objetivo es generar un método que relacione la desalineación y el consumo energético aplicando el análisis de vibraciones en el equipo motriz, dentro del estudio se evidencia que a mayor desalineación, se incrementa el consumo energético y las vibraciones de los equipos rotativos; además se recomienda realizar este estudio con la utilización de diferentes acoples flexibles como: acoples con forma de 8, acoples de tipo engranajes y acoples de tipo disco (Gavilanes y Henry, 2017: pp.1-10).

El modelo empírico de influencia de la desalineación en el consumo energético de un motor eléctrico MAJA 3F de 5 HP; su objetivo es cuantificar los efectos en el incremento de consumo energético y el nivel de vibraciones para casos similares sugiriendo la utilización de acoples flexibles debido a la reducción de vibraciones en los mismos (Flores y Silva, 2017: pp.1-15).

Al realizar los estudios en el sector empresarial se obtiene la evaluación de los elementos rotativos mediante el análisis de vibraciones en el proceso de elaboración de tubos PVC en la empresa HOLVIPLAS S.A. del cantón Ambato-Provincia de Tungurahua, donde se evaluó a los diferentes elementos rotativos de los equipos de la empresa y cómo esto afecta el nivel de vibraciones a los equipos de ésta (Salguero y Villegas, 2014: pp.1-3).

Empresas como PRUFTECHNIC han generado manuales e instructivos en los cuales se muestra los efectos producidos por desalineación en el consumo energético y en la vida útil en elementos, por tal razón han determinado que mediante una alineación rigurosa se obtiene una reducción aproximada del 10% de consumo energético. A los estudios realizados se relacionan efectos que se pueden visualizar en los equipos como una vibración excesiva, incremento de temperatura, entre otros (PRUFTECHNIK, 2017: p.6).

Este tipo de investigaciones muestran que en el Ecuador la eficiencia energética es una prioridad tanto en el ámbito académico como en la vida práctica donde la relación entre la cantidad de energía consumida y el costo, son una prioridad para el sector industrial.

1.2. Definición del problema

Los estudios realizados actualmente están enfocados de manera separada para la desalineación tanto paralela como angular en relación con el consumo energético, debido a la aplicación de métodos que requieren el uso de dos variables para su desarrollo. En consecuencia, en el mercado se encuentran tablas que relacionan; a nivel general; las medidas de desalineación con un estimado en el incremento del consumo energético, sin tomar en cuenta los diferentes tipos de acoples flexibles y sus características como: sus formas y los materiales de construcción. Por lo cual una estandarización de una ecuación o tablas que permitan establecer la relación entre el desalineamiento combinado y el consumo energético del equipo no es adecuado debido a las características de cada uno de los acoples lo que genera variaciones en los resultados.

1.3. Justificación e importancia

La desalineación presente en los equipos industriales es una desalineación combinada, entre dos ejes que se encuentran unidos por un acople flexible en la mayoría de los casos, al encontrarse diferentes tipos de acoples flexibles y que cada uno le corresponden sus propias características, las ecuaciones que se han utilizado hasta el momento presentan variaciones en el incremento de consumo energético dependiendo de acople utilizado.

Una muestra de las ecuaciones planteadas se encuentra en manuales de proveedores de equipos de alineación como PRUFTECHNIC que han desarrollado sus investigaciones de forma general y cada uno de sus valores varían dependiendo de la temperatura de trabajo, el tipo de carga y las características del material.

Las ecuaciones que permiten determinar el consumo energético en función de la desalineación paralela o de la desalineación angular fueron obtenidas por el método analítico de regresión lineal o con aplicación del método de mínimos cuadrados, mismos que para su desarrollo analiza dos variables, utilizando como elemento de unión entre los ejes un acoplamiento de mandíbula.

La propuesta del trabajo de investigación radica en la obtención de una ecuación que relacione tres variables, siendo éstas; la desalineación paralela, la desalineación angular y el consumo energético, para cada uno de los 3 tipos de acoples flexibles que se utilizarán: acople de mandíbula, acople con cubierta de poliuretano y acople de tipo dona y mediante el método de regresión lineal múltiple. Lo que permitirá una mayor precisión del consumo energético y la desalineación para cada uno de estos tipos de acoples flexibles.

1.4. Objetivos

1.4.1. *Objetivo general*

Comparar el consumo energético de la desalineación de ejes con diferentes acoples flexibles utilizando regresión lineal múltiple.

1.4.2. *Objetivos específicos*

Adecuar el módulo de estudio de la desalineación para poder trabajar con tres tipos distintos de acoples flexibles.

Recolectar los datos de las mediciones de desalineación, vibración y consumo energético con tres tipos distintos de acoples flexibles.

Realizar la regresión lineal múltiple para cada uno de los tipos de acoples flexibles.

Analizar los resultados obtenidos de la regresión lineal múltiple.

1.5. Hipótesis

El consumo energético de un equipo con diferentes grados de desalineación depende del tipo de acople flexible montado y el nivel de vibración presente.

1.5.1. Variable dependiente

Consumo energético

1.5.2. Variables independientes

Tipo de acople flexible

Desalineación paralela

Desalineación angular

Desalineación combinada

Amplitud global de vibraciones rms

1.6. Términos estadísticos

La estadística se define como el instrumento que recoge, analiza, organiza, presenta y compila los datos numéricos requeridos que son de utilidad para la toma acertada de decisiones, convirtiéndose así en un instrumento fundamental con el que contamos hoy en día (Ramos et al., 2020: p.18).

La estadística está presente en el día a día al momento de utilizar las técnicas de contabilización ya sea en el hogar, la oficina, el estudio, actividades de recreación u otras que la impliquen (Islas et al., 2018: p.7).

1.6.1. Población

Se encuentra conformado por todos los elementos de la investigación que compartan una característica deseada (Ramos et al., 2020: p.18).

La población se clasifica en:

- **Población finita.** Es aquella cuyos elementos son susceptibles a ser contados (Ramos et al., 2020: p.19).
- **Población infinita.** Es aquella cuyos elementos no son susceptibles de ser contados, en otras palabras son ilimitados (Ramos et al., 2020: p.19).

1.6.2. *Muestra*

La muestra es una parte de la población que se delimita mediante el criterio de un experto o mediante el uso de técnicas estadísticas (Ramos et al., 2020: p.20).

Según la cantidad de elementos que se encuentran contenidos la muestra se puede clasificar en grande o pequeña, dándose el primer caso cuando la cantidad de elementos es de 30 o mayor (Islas et al., 2018: p.19).

1.6.3. *Tamaño de la muestra*

$$n = \left(\frac{Z_{\alpha/2} * \sigma}{e} \right)^2 \quad (1)$$

Donde

n = Tamaño de la muestra

$Z_{\alpha/2}$ = Valor obtenido de la distribución normal según el nivel de confianza

σ = Desviación estándar

e = Error máximo tolerable

Esta ecuación permite determinar la cantidad de datos que serán representativos para el proyecto de carácter investigativo, la misma cumple la característica de ser aplicable al estudio de una población de tipo infinita.

1.6.4. *Recolección de datos*

La recolección de datos hace referencia a las técnicas y herramientas que puede emplear el evaluador en el desarrollo de la información requerida (Islas et al., 2018: p.21).

1.7. Desalineación

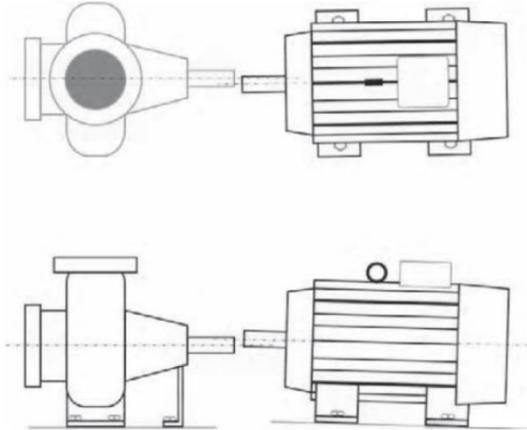


Figura 1-1: Desalineación en conjunto de bombeo

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

La desalineación es una deficiencia mecánica que aparece debido a la pérdida de colinealidad entre los centros geométricos de los ejes de un conjunto mecánico conformado por un elemento conductor y un elemento conducido.

La desalineación de equipos rotatorios ocurre cuando los ejes que intervienen en el movimiento se desvían de su posición llegando a generar diferentes cargas tanto axiales como radiales a los componentes relacionados. Por otro lado, la alineación es la acción que busca corregir la desalineación y mitigar sus efectos (Morado y Besa, 2018: p.218).

Se considera que la desalineación es imposible eliminarla debido a los factores de trabajo de los equipos, las condiciones de los componentes de cada equipo, además de las condiciones de montaje y desmontaje con cada una de las reparaciones.

En transmisión de potencias pequeñas y bajas velocidades se le resta importancia a la desalineación ya sea esta paralela, angular o combinada, en el caso de transmisión de altas potencias la presencia de desalineación se convierte en crítica para la vida útil de los elementos que conforman el sistema.

1.7.1. Causas de la desalineación

La desalineación se genera en diferentes etapas de la vida útil de un activo y por diferentes razones entre las que se tienen:

- Exceso de confianza en los materiales utilizados.
- Defectos asociados al montaje.
- Mecanizado defectuoso del acoplamiento.
- Dilatación térmica de diferentes componentes durante el funcionamiento.
- Defectos del material del acoplamiento.
- Deformaciones (patas cojas) (Lémoli, 2021).
- Holguras o pérdida de ajuste en la bancada debido a distorsiones durante el periodo de actividad de la máquina.
- Mala alineación entre cojinetes o apoyos.
- Ejes con flecha excesiva o ya sea doblados (Morado y Besa, 2018).
- Chasis sin rigidez, con grietas por fatiga dinámica.
- Pernos de anclaje de sobredimensionados.
- Asientos del equipo irregulares (Aroeira, 2019).

1.7.2. Consecuencias de la desalineación

El primer efecto que se origina a causa de ejes desalineados es la aparición de componentes como la fuerza radial, el momento flector y la fuerza axial, producidas por el elemento de unión, normalmente un acople de tipo flexible. La fuerza radial se la asocia a la desalineación paralela, en tanto que el momento flector y la fuerza axial están asociados a la desalineación angular (Morado y Besa, 2018: p.219).

Las consecuencias de que un equipo se encuentre desalineado se presentan de manera visible a los sentidos humanos y de manera no visible, para lo cual se requieren equipos especializados, a continuación, se presentaran las consecuencias más comunes y su método de detección:

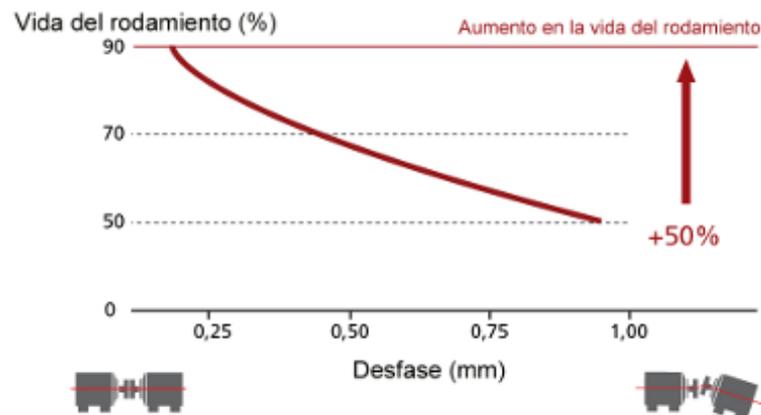


Gráfico 1-1: Relación entre la desalineación y la vida útil de un rodamiento

Fuente: Álvarez, N. 2020

- **Reducción de la vida útil de los rodamientos y cojinetes.** La desalineación en los ejes que contienen rodamientos o cojinetes generan en una carga axial en los elementos rodantes, provocando un mayor desgaste y una reducción de la vida útil. La vida útil es inversamente proporcional a la distancia entre los ejes de rotación como se indica en el gráfico 1-1.
- **Reducción de la vida útil de sellos mecánicos.** Al encontrarse desalineada una bomba, los sellos mecánicos de ésta soportan una carga axial que incrementa según la medida de desalineación, en consecuencia, la vida útil de los sellos mecánicos se reduce según el nivel de desalineación.

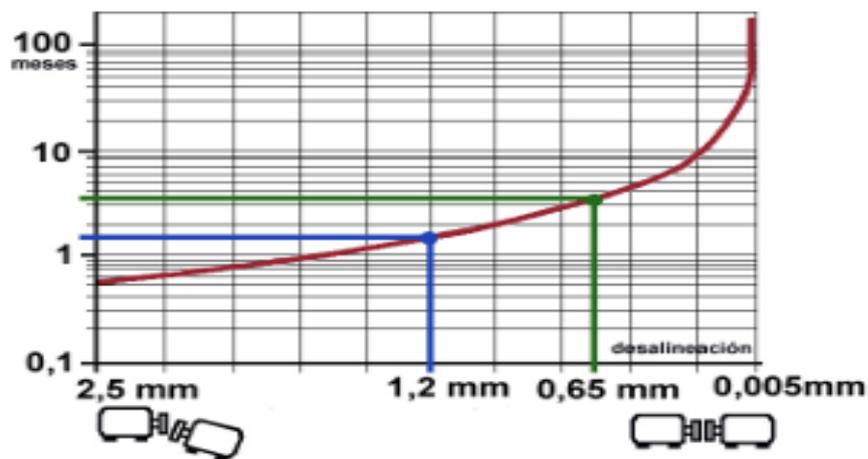


Gráfico 2-1: Relación entre desalineación y vida útil de sellos mecánicos

Fuente: Álvarez, N. 2020

- **Reducción de la vida útil de los acoples.** La fricción generada entre los acoples al encontrarse desalineados genera un incremento de temperatura en éstos y en los equipos que conectan, además se desgastarán sus componentes con mayor rapidez, esto se puede detectar mediante los instrumentos de termografía.

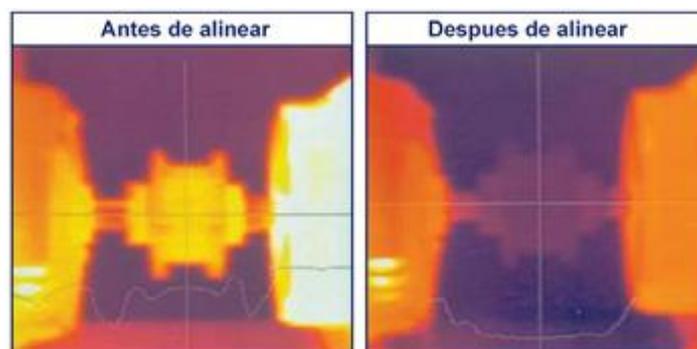


Figura 2-1: Efectos de la desalineación en acoples flexibles

Fuente: Álvarez, N. 2020

- **Incremento del consumo energético.** Al encontrarse presente la desalineación tanto paralela como angular el consumo energético se ve incrementado hasta un diez por ciento en relación con el nivel de desalineación presente en el equipo(Álvarez, 2020, pp.12-14).

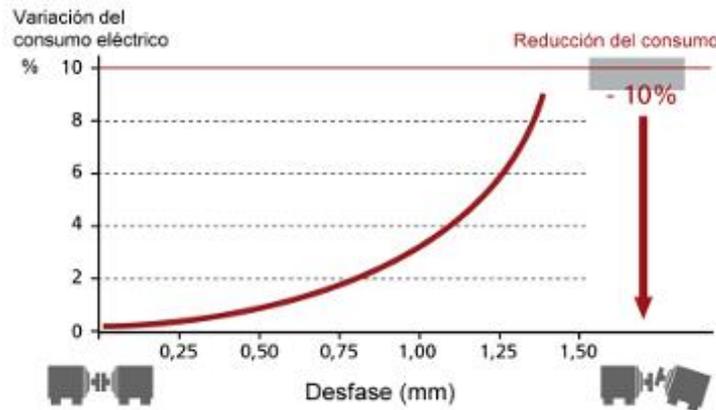


Gráfico 3-1: Relación entre la desalineación y el consumo energético

Fuente: Álvarez, N. 2020

- **Calidad del producto producido.** La desalineación provoca la disminución de la calidad del producto al variar las características de funcionamiento de los equipos
- **Incremento de vibración.** La aplicación de fuerzas axiales y radiales debido a la desalineación producen un incremento de la vibración de los equipos.

1.7.3. *Objetivos de la alineación de ejes*

El motivo principal de la alineación de ejes es la preservación de la vida útil de los elementos mecánicos que conforman una máquina rotativa, es así que aplicar un correcto proceso de alineación permite:

- Disminuir las cargas en los apoyos de los ejes.
- Reducir la deflexión de los ejes.
- Minimizar el desgaste de los componentes.
- Disminuir la vibración del conjunto (Morado y Besa, 2018).

1.8. **Tipos de desalineación**

La desalineación que se presenta en máquinas rotativas es de tipo paralela o de tipo angular y más

comúnmente una combinación de éstas, se la clasifica de la siguiente forma:

1.8.1. *Desalineación paralela*

La desalineación paralela surge al momento que los centros de rotación de los ejes motriz y conducido forman un paralelismo entre ellos, este paralelismo puede ser de tipo vertical u horizontal.

El análisis vibracional del espectro producido en el sentido radial a 1x y 2x RPM de la línea de acción del eje permite su detección debido a la presencia de armónicos superiores de menor amplitud (Flores y Silva, 2017: p.4).

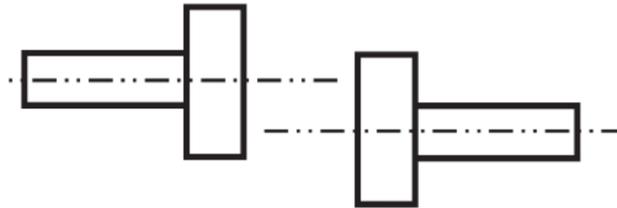


Figura 3-1: Desalineación paralela

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

1.8.2. *Desalineación angular*

La desalineación angular surge cuando los centros de rotación de los ejes motriz y conducido se cortan formando un ángulo entre éstos.

Produce una fuerza en dirección axial y un momento flector en la línea de acción del eje presentándose espectros de vibraciones a 1x y 2x RPM cuya fase es opuesta (Flores y Silva, 2017: p.4).

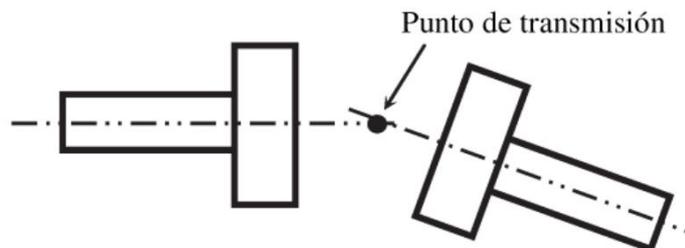


Figura 4-1: Desalineación angular

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

1.8.3. *Desalineación combinada*

Ésta se forma al unir los dos tipos de desalineación tanto paralela como angular, es la desalineación mayormente presente en el campo laboral.

1.9. **Acoples flexibles**

Elementos empleados para transmitir potencias moderadas o elevadas en aplicaciones industriales, su flexibilidad se consigue mediante mecanismos o pseudo-mecanismos que permiten la posibilidad de movimiento relativo entre las piezas que integran el acoplamiento y, mucho menos, de la posibilidad de deformación (flexibilidad) de las mismas piezas.

Los acoples flexibles protegen a las máquinas rotativas de fatiga, estrés mecánico, desgaste por fricción, llegando a disminuir significativamente el costo por tiempo de no operatividad en la industria. Su vida útil depende de una correcta selección, instalación y mantenimiento (Fernández, 2016).

1.9.1. *Acoples de mandíbula*

El acople de mandíbula cuenta con dos masas metálicas que terminan en una forma especial de manera que el hueco entre ambas es ocupado por una pieza elastomérica que está sometida a compresión entre las masas. La masa accionadora impulsa el movimiento de rotación mientras que la maza conducida se resiste a dicho movimiento, resultando en una compresión del elemento elastomérico intermedio.



Figura 5-1: Acople tipo mandíbula

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

Las masas metálicas son simétricas y están construidas en acero sinterizado, acero inoxidable, aluminio o bronce, con una perforación central, un alojamiento para chaveta y un tornillo de tipo prisionero. La pieza elastomérica (estrella) puede ser fabricada de caucho nitrílico en color negro,

poliuretano y elastómero de poliéster (Lovejoy).

1.9.2. *Acoples con cubierta de poliuretano*

El acople con cubierta de poliuretano consta de dos masas sólidas cuya unión se da a través de una cubierta constituida por dos medias lunas de material elastomérico y metálico que se sujetan a dichas masas mediante tornillos.



Figura 6-1: Acople con cubierta de poliuretano

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

Las masas metálicas son simétricas y están construidas en acero sinterizado con un agujero central, una cavidad para chaveta y un tornillo de tipo prisionero. Las medias lunas de elemento elastomérico están fabricadas en poliuretano (SEALCO S.A).

1.9.3. *Acoples tipo dona*



Figura 7-1: Acople tipo dona

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

El acople tipo dona (rosquilla) es un elemento sometido a esfuerzo cortante. Su elemento

elastomérico no se sujeta a las masas por medio de elementos de presión, sino que solamente transmiten el par debido a la geometría anti-rotación con que están fabricados tanto el elemento elastomérico como los alojamientos de las masas.

Las masas metálicas son simétricas, con dientes internos, un agujero central con cavidad para chavetero y un tornillo de tipo prisionero y están construidas en zinc o hierro fundido. El elemento elastomérico en su parte externa de contacto posee dientes externos, el material del que se fabrica es el caucho EPDM, neopreno o Hytrel (Lovejoy).

1.10. Matriz energética del Ecuador

Hoy en día, los habitantes de los países industrializados han experimentado profundos cambios en su forma de vida, pasando de una economía de subsistencia a una basada en la industria o los servicios. El sistema energético se basa principalmente en la interacción oferta – demanda de los recursos energéticos disponibles y sus transiciones (refinerías, termoeléctricas, hidroeléctricas, eólicas, etc.). Los resultados de esta interacción son evidentes en el balance energético anual del país y reflejan las tendencias de producción, importación, exportación y consumo entre fuentes y sectores, cuyo análisis es la base para la planificación maestra para garantizar la producción, la seguridad y el uso adecuado de la energía (Palomeque y Ilbay, 2018: p.26).

El balance energético nacional de 2016 basado en el año 2015 en la matriz energética del Ecuador, así como en la mayoría de los países del mundo muestra como predomina el uso de combustibles fósiles. El petróleo representa actualmente el 88% de la producción total de energía primaria, y el resto corresponde a generación hidroeléctrica y renovable (solar y eólica), alcanzando una oferta de energía primaria de 225 millones de barriles equivalentes de petróleo (BEP) (Palomeque y Ilbay, 2018: p.26).

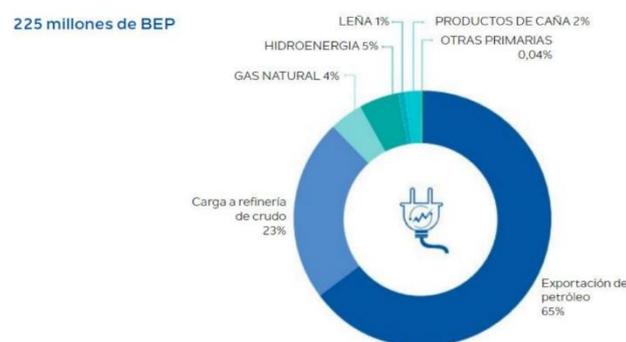


Gráfico 4-1: Producción energética primaria año 2015

Fuente: Ministerio coordinador de sectores estratégicos, 2016

La producción de energía eléctrica secundaria de las subestaciones alcanzó cerca de 65 millones de BEP en el año 2015, de los cuales el 24,8% correspondió a energía eléctrica y el 75,2% a derivados del petróleo, siendo los más producidos el fuel oil, seguido del diésel y la gasolina.

La demanda de energía alcanzó los 95 millones de BEP en el año 2015, los sectores más demandantes son: la transportación con el 46%, el sector industrial con el 19% y el sector residencial con el 13%. El 72% de la demanda total de energía se cubre con combustibles líquidos, especialmente para el transporte y la industria, siendo esta cubierta en un 12% de sus necesidades con biocombustibles derivados de la caña de azúcar y leña. En el caso de la demanda interna, el 52% se abastece con gas licuado de petróleo (GLP), el 35% con electricidad y el resto con leña (Palomeque y Ilbay, 2018: p.26).



Gráfico 5-1: Demanda de energía por sector, año 2015

Fuente: Ministerio coordinador de sectores estratégicos, 2016

Para el año 2017, con la puesta en marcha de nuevas centrales hidroeléctricas, se espera un cambio en los patrones de suministro y consumo de energía, debido a la incorporación de cocinas eficientes gracias a la tecnología de inducción, que ayudarán a reducir la dependencia de fuentes renovables de origen fósil en el país (Palomeque y Ilbay, 2018: p.28).

1.11. Consumo energético

El consumo energético se encuentra directamente relacionado con las emisiones de dióxido de carbono, de igual manera un incremento del mismo supone un aumento final en los costes de producción de las industrias.

1.11.1. Situación del consumo energético

A nivel mundial en el año 2018 el consumo de energía final fue de 9,9381 millones de toneladas equivalentes de petróleo (Mtep), el doble respecto al consumo registrado en 1973 concentrado

entre los países de la OCDE y China, que representan alrededor del 59% del consumo mundial total, mientras que América Latina y el Caribe contribuyen con el 4,6%.

La matriz global de consumo de energía ha aumentado significativamente y su composición estructural ha cambiado debido a su diversificación a través de fuentes de energía más limpias, destacando un mayor uso del gas natural que se denomina energía de transición y electricidad. Durante el año 1973 aproximadamente el 76% del consumo total correspondía a petróleo y derivados de petróleo, gas natural y carbón mineral en tanto que, en el año 2018, existió una reducción porcentual del 67% y se registró un incremento en el consumo eléctrico de 10 puntos porcentuales(OLADE, 2020: p.01).

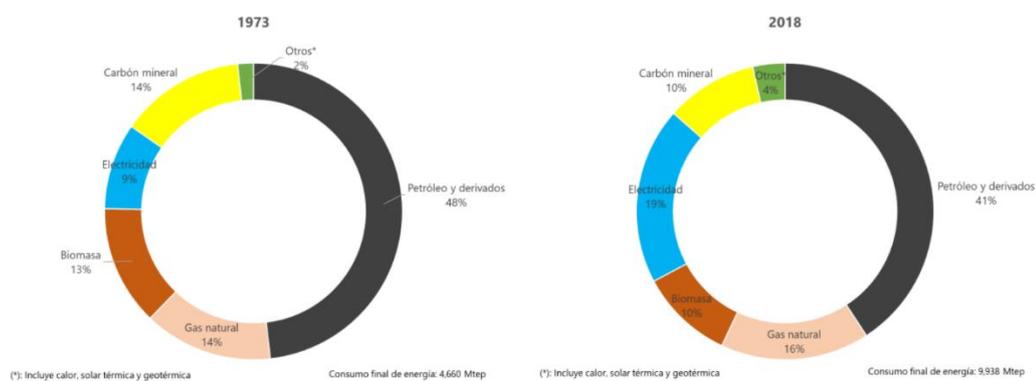


Gráfico 6-1: Situación del consumo energético a nivel mundial

Fuente: Olade, 2020

1.11.2. *Energía eléctrica*

La energía eléctrica es medida en vatios (W) por hora (h) o su múltiplo kilo Vatios por hora (kWh) y es la capacidad de la electricidad para realizar un trabajo. La energía eléctrica puede transformarse en muchas otras formas de energía, tales como la energía luminosa o luz, la energía mecánica y la energía térmica (Díaz, 2018: p.38).

1.11.3. *Gestión de la energía*

La norma ISO 50001 define a un Sistema de Gestión de la Energía como el 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 (Flores y Silva, 2017: p.16).

Se refiere a un conjunto de medidas técnicas y organizativas donde también se contemplan aspectos relativos al comportamiento humano, orientados al uso eficiente de la energía y por lo tanto a la eficiencia de los costos energéticos.

El objetivo que persigue la gestión energética es reducir el coste de la energía en la industria, a partir del uso eficiente de los recursos productivos, que conlleve mejoras en los consumos específicos (energía utilizada por unidad de producto) y con ello, aumentar la competitividad de la industria (Díaz, 2018: p.40).

El uso eficiente de recursos energéticos, o productivos en general, “No” se opone a las metas de producción. Un plan de gestión energética, bien diseñado, debe formar parte del esfuerzo general por alcanzar un óptimo en:

- Efectividad en los costos.
- Confiabilidad de la planta.
- Calidad del producto.
- Mínimo impacto ambiental.

1.11.4. *Gestión de la energía eléctrica*

La gestión de la energía eléctrica se basa en la premisa de que no se puede gestionar aquello que no se puede medir. La gestión de este recurso se plasma en un procedimiento organizado de previsión y control del consumo de energía.

Su finalidad es obtener la mayor eficiencia en el suministro, conversión y utilización de la energía eléctrica, sin afectar los niveles de producción en el proceso productivo y las prestaciones necesarias para obtener niveles de confort adecuados.

Al crecer los costes de la energía eléctrica y su consumo, se hace más necesario formular acciones estratégicas resultante de un diagnóstico situacional en las instalaciones de la empresa, en el que se han detectado oportunidades de mejora que permitan ahorrar los consumos y el pago por el servicio.

1.11.5. *Eficiencia energética*

La eficiencia energética puede ser definida por la capacidad de transformar un tipo de energía en

otro con la menor cantidad de pérdidas.

Proporción u otra relación cuantitativa entre el resultado en términos de desempeño, de servicios, de bienes o de energía y la entrada de energía (ISO, 2018).

1.11.5.1. *Eficiencia energética eléctrica*

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.

Un estudio de ahorro y eficiencia energética está formado por 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 (Flores y Silva, 2017: pp.16-17).

La eficiencia energética es el uso eficiente de la energía, de esta forma se optimizan los procesos de producción y uso de la energía utilizando la misma cantidad o menos para producir más bienes y servicios, o, dicho de otra forma, producir más con menos electricidad.

El ahorro energético, el consumo responsable y el uso eficiente de las fuentes de energía eléctrica son fundamentales a todos los niveles. La importancia de las medidas de ahorro y eficiencia energética se refleja en la necesidad de reducir la factura energética, limitar la dependencia energética externa y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y los derechos de compra de emisiones para cumplir los compromisos asumidos al ratificar el Protocolo de Kioto (Caja de Ingenieros, 2017).

El camino hacia la eficiencia energética eléctrica en las organizaciones tiene que recorrerse adoptando estrategias encaminadas hacia:

- Reducción de la demanda energética.
- Diversidad energética.

- Máximo aprovechamiento del uso de energías disponibles.
- Innovación tecnológica.
- Autoconsumo a través de micro redes.
- Modificación de los hábitos de consumo (Díaz, 2018, p.39).

1.11.5.2. *Diagnóstico de la energía eléctrica*

Es una herramienta de investigación, destinada a ayudar a determinar cómo se utiliza la energía eléctrica en diferentes sistemas eléctricos. Es la prueba, estudio y análisis de los flujos de energía en una instalación eléctrica de consumo de energía, un proceso o un sistema para comprender la dinámica energética del sistema.

Por lo general, las auditorías de energía se realizan para buscar oportunidades para reducir la cantidad de energía que ingresa al sistema sin afectar negativamente la salida. Es la aplicación de un conjunto de técnicas que ayudan a determinar con qué eficiencia se utiliza la energía eléctrica mediante un análisis crítico de las instalaciones consumidoras de energía, establecer un punto de partida para la implementación y control de un programa de ahorro de energía que determina dónde y cómo se utiliza, además de proveer el nivel de residuos (Díaz, 2018, p.44).

Beneficios que se desea alcanzar:

- Optimización del consumo energético, lo que se traduce en una importante reducción de costos.
- Aumentar el tiempo de vida de los equipos, ya que se asegura que éstos trabajen en las condiciones más adecuadas, evitando sobredimensionamientos o sobrecargas.
- Incrementa el abastecimiento de energía eléctrica a lugares que carecen de este servicio vital.
- Mayor respeto y conservación del medio ambiente, ya que, al no consumirse más energía que la necesaria, se disminuyen las emisiones de CO₂, tanto en la planta como en la producción de la electricidad consumida.
- Todo esto se traduce en una contribución a la mejora de la imagen de la empresa al contribuir al bienestar social (Díaz, 2018, p.45).

Instrumentos para la medición de campo:

- Pinzas amperimétricas.

- Multímetro.
- Luxómetro.
- Analizador de la calidad energética.

1.12. Termografía

La termografía analiza el comportamiento de la temperatura, sin necesidad de contacto, que se basa en la medida de longitudes de onda infrarrojas para determinar temperaturas desde una distancia segura a fin de evaluar el correcto funcionamiento de una máquina (Nájera y Pilataxi, 2017: p.23).

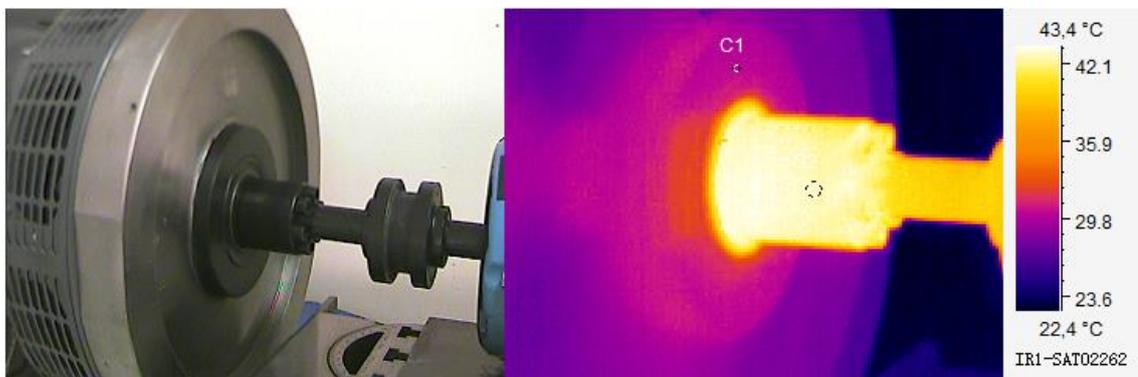


Figura 8-1: Termografía de rodamiento

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

Las cámaras térmicas proporcionan imágenes que utilizan diferentes colores para representar diferentes temperaturas que aportan a la identificación de puntos calientes. Los puntos calientes o un aumento de la temperatura suelen indicar una avería inminente.

Las cámaras capturan y almacenan datos de temperatura de los miles de puntos que componen una imagen térmica permitiendo realizar un análisis detallado y la modificar parámetros clave como la emisividad o el rango de temperatura, ya sea directamente en la cámara o mediante el software para PC.

La energía que emite un aparato o máquina desde su superficie se transmite en forma de onda electromagnética a la velocidad de la luz; esta energía es directamente proporcional a su temperatura, lo que significa que, a mayor calor, mayor cantidad de energía liberada (Nájera y Pilataxi, 2017: p.23).

1.12.1. Características principales de las cámaras termográficas

Determinar la lectura del termograma tomando características como: emisividad, reflectividad y transmisividad (Nájera y Pilataxi, 2017: p.24).

1.12.2. Aplicaciones de la termografía

1.12.2.1. Detección de conexiones eléctricas sueltas o con corrosión.

El principal beneficio de aplicar termografía a los elementos del sistema eléctrico es que los componentes eléctricos comienzan a mostrar signos de falla tan pronto como se instalan, independientemente de la carga en el circuito, el manejo y el paso del tiempo. Cuando la conexión se suelta o tiene algún tipo de corrosión, la resistencia aumenta al igual que la caída de tensión y se genera un aumento del calor pudiéndose detectar un fallo antes de que se produzca una avería utilizando una cámara termográfica (Nájera y Pilataxi, 2017: p.24).

1.12.2.2. Detección de desequilibrios y sobrecargas eléctricas.

Un desequilibrio eléctrico puede deberse a diversas razones: un problema de alimentación, baja tensión en una fase o una ruptura de la resistencia del aislamiento de las bobinas del motor haciendo que los motores y otras cargas requieran más corriente, dispongan de un par más bajo estropeándose antes. Para su detección, un desequilibrio en la carga, las fases con la mayor carga tendrán mayores temperaturas. En cualquier caso, habría que realizar la medida de la carga eléctrica para corroborar el diagnóstico del problema (Nájera y Pilataxi, 2017: p.25).

Según la NETA (*International Electrical Testing Association*), si la diferencia de temperatura entre componentes similares bajo cargas similares supera los 15°C, deben llevarse a cabo reparaciones de forma inmediata. De igual manera, recomienda que se lleva a cabo la misma medida cuando la diferencia de temperatura de un componente y del aire supere los 40°C.

1.13. Análisis de vibraciones

Esta técnica predictiva basada en la detección de fallos en equipos rotativos mediante el estudio de los niveles de vibración. El objetivo final es obtener una representación del espectro de vibración de un instrumento activo para su posterior análisis. Para poder aplicarlo de manera efectiva y obtener conclusiones válidas y representativas, es necesario conocer ciertos datos de la

máquina como la velocidad de rotación, el tipo de cojinete, la correa, el número de filos o cuchillas, etc. y seleccionar el punto de medición correcto. También es importante seleccionar el analizador que mejor se adapte al equipo existente en la planta (Fernández y Toapanta, 2015: p.09).

1.13.1. *Vibración*

Son oscilaciones periódicas o aleatorias, de tipo mecánicas, alrededor de un punto de equilibrio. Sus características principales son: frecuencia natural, amplitud, fase, periodo, frecuencia, vibración lineal, resonancia (Nájera y Pilataxi, 2017: pp.11-12).

1.13.2. *Vibración simple*

La característica principal de una señal oscilante en el dominio del tiempo es una onda sinusoidal. Estas son las oscilaciones más simples y puras. Una oscilación puede ser representada por un sistema masa resorte, si la masa se mueve una cierta distancia desde el punto neutral y luego se suelta, el resorte la devolverá al equilibrio, este fenómeno cambia la energía cinética debido a la masa ganada y la energía potencia que tiene para ganar el resorte. Este sistema ideal casi nunca se encuentra en una máquina real, ya que cualquier sistema tendrá cierta fricción y esto hará que cambie la amplitud de las oscilaciones (Fernández y Toapanta, 2015: p.09).

1.13.3. *Vibración compuesta*

Está formado por la suma de diferentes oscilaciones simples. Todas las máquinas están formadas por oscilaciones compuestas, producto de oscilaciones simples que se originan en sus partes internas giratorias. Sabiendo esto, se describe que la forma de onda oscilante de una máquina no es una señal sinusoidal pura, sino que tiende a ser más compleja. Se agregan dos señales oscilatorias diferentes para crear una compuesta. Las ondas de este tipo tienen un alto grado de complejidad para obtener los valores de amplitud y tiempo correspondientes, por lo que el análisis debe realizarse en el dominio de la frecuencia aplicando la transformada rápida de Fourier (Fernández y Toapanta, 2015: p.10).

1.13.4. *La transformada rápida de Fourier (FFT)*

La vibración se puede estudiar y comprender mejor en el dominio de la frecuencia. La oscilación en el dominio del tiempo es la señal de la máquina. Estas señales contienen toda la información sobre el funcionamiento de cada componente de la máquina. Hay una limitación a la hora de ir a

diagnosticar, estas señales están saturadas de mucha información compleja proveniente de las señales de cada elemento que compone la máquina. Por esta razón, las oscilaciones se pueden estudiar y comprender mejor en el dominio de la frecuencia aplicando la transformada rápida de Fourier. Este es la figura de amplitud vs. Frecuencia y llamado espectro.

Todas las secuencias de señales sinusoidales en el dominio del tiempo se calculan a partir de la señal dada y, finalmente, cada secuencia se representa en el dominio de la frecuencia (Fernández y Toapanta, 2015: p.11).

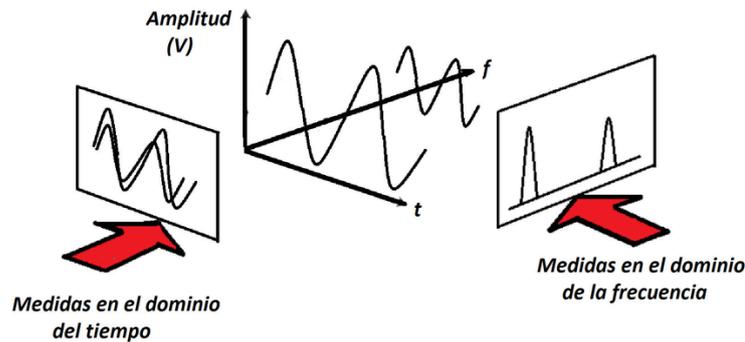


Figura 9-1: Señal en el dominio de frecuencia y en el dominio del tiempo

Fuente: Molina, J., 2017.

1.13.5. Sentidos principales de medición

Para efectuar una medición fiable se requiere al menos un punto en la máquina (insertos) para saber si existe una vibración considerable. Existen tres tipos de direcciones para realizarla: axial, radial y tangencial (Fernández y Toapanta, 2015: p.11).

1.14. Modelos de regresión

La regresión lineal es una técnica estadística que analiza si los valores de una variable a la que se denomina dependiente, pueden predecirse mediante, un modelo lineal conociendo los valores de otras variables, a las que se denominan independientes.

1.14.1. Regresión lineal múltiple

La regresión lineal múltiple permite analizar más de una variable independiente. A la variable dependiente también se le denomina respuesta y a las variables independientes, predictoras, explicativas y regresores. El modelo matemático es el siguiente:

$$Y=B_0+B_1X_1+\dots+B_KX_K \quad (2)$$

Donde

Y: Representa a la variable dependiente.

B_0 : Es el coeficiente de regresión correspondiente a la i -ésima variable; indica el incremento de la variable dependiente por aumento unitario de la i -ésima variable independiente, suponiendo fijas el resto de variables.

B_1 : Es el efecto de incremento de una unidad de la variable predictora.

X_1 : Variable explicativa.

1.14.2. Condiciones de la regresión lineal múltiple

1.14.2.1. Multicolinealidad

Para el caso de los modelos lineales múltiples los predictores deben ser independientes, no debería existir colinealidad entre ellos.

La colinealidad ocurre cuando un predictor está relacionado linealmente con uno o más predictores en el modelo o cuando es una combinación lineal de otros predictores. Debido a la colinealidad, no es posible determinar con exactitud el efecto individual que cada variable colineal tiene sobre la variable respuesta, lo que lleva a un aumento en la varianza de los coeficientes de regresión estimados hasta el punto de que es casi imposible establecer sus estadísticas. Además, pequeños cambios en los datos conducen a grandes cambios en las estimaciones de los coeficientes. Aunque la colinealidad en sí misma existe si y solo si la correlación simple o múltiple entre algunas variables independientes es 1, esto rara vez sucede en la práctica. Sin embargo, a menudo se encuentra la llamada normalidad en línea o multicolinealidad imperfecta (Maydana, 2021, p.21).

1.14.2.2. Parsimonia

Este término se refiere a que el mejor modelo es aquel capaz de explicar de mejor manera la variabilidad que se observa en la variable respuesta empleando el menor número de predictores posibles (Maydana, 2021, p.23).

1.14.2.3. Relación lineal entre los predictores numéricos y la variable respuesta

Cada predictor numérico tiene que relacionarse linealmente a la variable dependiente o respuesta mientras que los otros predictores se mantienen constantes caso contrario no podrían ser utilizados en el modelo. La forma de comprobar dicha relación es representando los residuos del modelo

que mejor se ajusta frente a cada uno de los predictores. En dicho caso si la relación es lineal los residuos se distribuirán de forma aleatoria tendiendo acercarse a cero. El análisis es aproximado ya que no hay forma de saber si realmente la relación es lineal cuando el resto de predictores se mantienen constantes (Maydana, 2021, p.23).

CAPÍTULO II

2. MARCO METODOLÓGICO

2.1. Análisis de la necesidad del módulo

2.1.1. Características del módulo

El módulo en el cual se va a realizar la desalineación se encuentra equipado por un motor jaula de ardilla trifásico de 3 700 W de potencia, un generador eléctrico monofásico de 120 V con una potencia nominal de 12,5 kW, una mesa de precisión milimétrica que permite realizar la desalineación paralela horizontal y angular, un sistema de control manual, entre otros. Los componentes al detalle son:



Figura 1-2: Componentes del módulo de generación monofásico

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

1. Generador eléctrico monofásico de 12,5 kW
2. Motor jaula de ardilla trifásico de 3,7 kW
3. Mesa de precisión milimétrica
4. Paro de emergencia
5. Acople
6. Toma corriente trifásico
7. Botonera de acción y paro del módulo
8. Calentadores monofásicos de 1,5 kW

9. Tomacorriente monofásico del generador
10. Tablero de control

2.1.2. *Necesidades del módulo*

El módulo que cuenta de un sistema de generación eléctrica monofásica, tras una inspección de los componentes y puesta en funcionamiento, se detectaron un conjunto de actividades que se deben realizar para que la investigación se desarrolle con normalidad, entre las necesidades del módulo se encuentran:

- **Cambio de terminales y borneras en el tablero de control.** – El tablero de control al inspeccionarse se encontró que los cales de alimentación del equipo se encontraban con terminales ponchados inadecuadamente, lo que generó fisuras en los terminales, además de que un conjunto de borneras se encontraba deteriorados los tornillos de ajuste y generaban un falso contacto.
- **Cambio de tornillería del módulo.** – Debido a las fuerzas radiales generadas por la desalineación paralela, angular y combinada, y que este módulo se lo utiliza para el aprendizaje de alineación de ejes, los pernos de anclaje se encuentran con un desgaste en la rosca y la cabeza de éstos, lo que genera un ajuste inadecuado y un incremento de la vibración del equipo.
- **Ajuste de la tornillería del módulo y tablero de control.** – Al utilizarse el módulo la vibración propia de funcionamiento genera un aflojamiento en la tornillería en general del módulo, así como de los componentes eléctricos del tablero de control.
- **Reparación del paro de emergencia.** – El botón paro de emergencia de tipo seta con enganche mecánico se encontraba mal montado lo que generaba que a su activación no se apague el equipo y al intentar desbloquear este no regrese a su estado original.
- **Reparación de los calentadores monofásicos.** – Al utilizar los calentadores uno de éstos dejó de funcionar por un tiempo y al volver a conectarle la función de calefacción se desconectó dejando únicamente la función de ventilación del calefactor.
- **Aplicación de pintura en los puntos de medición de termografía.** – El porcentaje de emisividad del acero pulido es bajo y al realizar la corrección de éste por medio de la aplicación Satir Report los valores de la temperatura son inferiores a los medidos por medios de contacto, por lo cual se va a realizar la aplicación de pintura que posea una emisividad de 0,9 en adelante.

2.2. Adaptación del módulo de pruebas

2.2.1. Cambio de terminales y borneras en el tablero de control

Los terminales que se encontraban mal ponchados se los cambió por terminales de tipo aguja de color azul para los elementos de control y medición, y para los elementos de potencia se colocó los terminales tipo aguja de color amarillo. Las borneras que se encontraban afectadas se cambiaron por unas adecuadas al nuevo tipo de terminal utilizado.



Figura 2-2: Tablero de control del módulo de generación monofásico

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

2.2.2. Cambio de tornillería del módulo

Se realizó el cambio de tornillería de anclaje del motor y de ajuste de la mesa de precisión milimétrica, por un conjunto nuevo de pernos y tuercas, los que a su vez se cambiarán durante la realización de las mediciones para evitar mediciones erróneas debido a un ajuste inadecuado. Ver figura 3-2



Figura 3-2: Tornillería antigua vs tornillería nueva

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

2.2.3. *Ajuste de tornillería del módulo*

Los elementos del tablero de control, pernos de anclaje y componentes del generador, así como los pernos de anclaje, tornillos del ventilador y tornillos de extensiones para la medición de vibración del motor de todos estos componentes se realizó el ajuste con las diferentes llaves, destornilladores y juego de copas, según haya sido necesario.



Figura 4-2: Ajuste de la tornillería del generador

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

2.2.4. *Reparación del paro de emergencia*

Para habilitar el paro de emergencia se realizó el desarme del cajetín, limpieza de los terminales, fijación del cable de alimentación del equipo para que no tenga contacto con el paro de emergencia y la colocación del botón de forma correcta.



Figura 5-2: Reparación del paro de emergencia

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

2.2.5. *Reparación de los calentadores monofásicos*

Al inspeccionar los calefactores se detectó que los cables que permiten el accionamiento de las resistencias no se encontraban correctamente empalmados, además que el terminal tipo plano hembra se encontraba con un juego que generaba un falso contacto en la perilla de accionamiento

y control de la temperatura del calentador. Tras realizar el empalme, unirlo con soldadura con estaño y ajustar el terminal tipo hembra el calefactor funciono sin ningún problema.



Figura 6-2: Reparación de los calefactores

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

2.2.6. *Aplicación de la pintura en los puntos de medición de termografía*

Debido al bajo coeficiente de emisión de los diferentes materiales del motor, acople y generador, se tomó la decisión de aplicar una capa de pintura de color negro mate en los elementos que se va a analizar su temperatura con los diferentes tipos de desalineación. Se aplica una capa de pintura debido a que los puntos en los que se va a realizar las mediciones son los mismos a lo largo de la investigación.

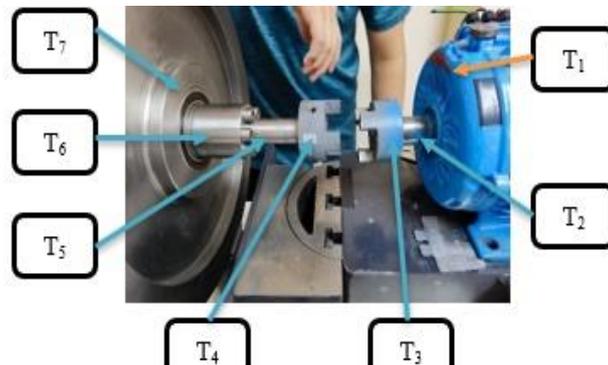


Figura 7-2: Zonas en las que se va a medir la temperatura

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.



Figura 8-2: Proceso de pintado de zonas de medición

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

2.3. Equipos necesarios

2.3.1. Analizador de la calidad de la energía

2.3.1.1. Programación del equipo

- A. Encender el analizador de la calidad de la energía eléctrica FLUKE 435-II
- B. Al aparecer la notificación de que la memoria esta lista para trabajar pulsar F5 para iniciar el equipo
- C. Pulsar el botón *SETUP* para ingresar a la configuración
- D. Pulsar F4 para activar la función *MANUAL SETUP*
- E. Con la flecha hacia abajo dirigirse a la opción *CONFG:* y pulsar el botón *ENTER*
- F. Pulsar F4 para cambiar el tipo de conexión y seleccionar la opción 3 fases con conexión en delta y tierra, oprimir *ENTER* para que se guarde
- G. Bajar a la opción *PHASE* y pulsar *ENTER*
- H. Para la selección del modelo de pinzas amperimétricas en la opción *Amp clamp* seleccionar i400s
- I. Para modificar el número de decimales entregados por el equipo en la opción *Clamp range:* seleccionar 10 mV/A
- J. Oprimir el botón F4 para configurar el neutro y repetir los pasos 8 y 9 en esta opción
- K. Pulsar el botón F5 para regresar a la configuración
- L. Para configurar el tiempo de adquisición de datos y la variable de potencia activa pulsar el botón *LOGGER*
- M. Desplazarse a la opción *Interval:* y seleccionar 10 s
- N. Pulsar F1 para entrar en la opción *SETUP READINGS*
- O. Seleccionar la categoría *Power*, la subcategoría *Reading* marcar **W** con F5
- P. Pulsar F5 para regresar a la opción *LOGGER*
- Q. Pulsar F5 para iniciar la medición

2.3.1.2. Recopilación de datos

- A. Colocar las 3 pinzas amperimétricas Fluke i400s en los cables que alimentan al motor
- B. Colocar las 3 pinzas de tipo lagarto en los terminales conectados en paralelo a la alimentación del motor
- C. Asegurar que los terminales de las pinzas amperimétricas y voltimétricas se encuentren conectados según los colores indicados en el equipo

- D. Colocar el equipo en una mesa contigua al modular para evitar insertar vibraciones en el equipo
- E. Con la configuración expuesta en el punto 2.3.1.1 realizar la medición por un lapso de 5 minutos con 20 segundos
- F. Al finalizar el tiempo pulsar F5 para guardar los datos y copiar el código con el que se han guardado

2.3.1.3. *Descargar los datos de las mediciones en el equipo*

- A. Pulsar el botón MENU
- B. Conectar el cable de datos en la parte lateral izquierda
- C. Abrir la aplicación PowerLog 4.5.
- D. En la opción Fichero seleccionar Descargar
- E. Buscar el código copiado en el punto 2.3.1.2 y oprimir la opción descargar para obtener el archivo con las mediciones

2.3.2. *Alineador láser de ejes*

2.3.2.1. *Colocación del equipo y proceso para obtener los datos de desalineación*

- A. Colocar los postes de soporte pegados al acople.
- B. Asegurar los postes al ajustar la cadena y que estos se encuentren de forma paralela.
- C. Colocar el transductor y reflector con las tapas de protección.
- D. Encender el equipo en Aux 2
- E. Pulsar el botón DIM
- F. Ingresar la distancia entre el transductor y reflector en milímetros.
- G. Ingresar el resultado del punto 6 dividido para 2
- H. Ingresar el diámetro del acople en milímetros
- I. Ingresar la distancia entre el transductor el eje del perno cercano de anclaje del equipo en milímetros.
- J. Ingresar la distancia entre los pernos de anclaje del equipo en milímetros.
- K. Pulsar el botón de *Measure* que tiene una M dentro de un ciclo de flechas
- L. Retirar la protección del transductor y mover el reflector hasta que marque en el centro del objetivo de la tapa de protección
- M. Retirar la tapa de protección del reflector y moverlo en los sentidos horizontales y verticales hasta que muestre en el equipo 0 – 0.

- N. Gire los acoples evitando que los postes de sujeción hagan contacto con la mesa de desalineación milimétrica
- O. Al marcarse todos los puntos presione la tercera tecla que es *Results*.
- P. Apuntar las medidas que aparecen en el orden: desalineación paralela vertical, desalineación angular vertical, desalineación paralela horizontal y desalineación angular horizontal.

2.3.3. *Analizador de vibraciones*

2.3.3.1. Proceso para realizar la medición de la frecuencia natural

- A. Encender el Vibracheck 200 y conectar el acelerómetro al canal 1
- B. Con los botones de desplazamiento dirigirse al icono REGISTRAR
- C. Seleccionar la opción MAINTRAQ VIEWER
- D. En una PC ejecutar el programa MAINTraq Analyzer
- E. Conectar la PC al Vibracheck 200 utilizando el cable de adquisición de datos y verificar el cambio de estado de la pantalla del equipo a CONECTADO
- F. En la PC cargar el programa para un acelerómetro y seleccionar la opción Medir
- G. Comprobar que el acelerómetro se encuentre censando
- H. Conectar el acelerómetro en el plano en el que se desea medir la frecuencia natural
- I. Proporcionar un golpe en el plano lo más cercano al acelerómetro
- J. En el programa MAINT seleccionar la opción HOLD

2.3.3.2. Programación y generación de la ruta

- A. Abrir la aplicación MAINTraq Predictive
- B. Seleccionar el fichero Configurar Bases de Datos
- C. En la ventana emergente seleccionar Nueva Base de Datos
- D. Asignamos un nombre a la base de datos para crearla
- E. En el fichero Máquinas seleccionar la base de datos deseada
- F. Generar una nueva carpeta con un clic derecho en el cursor
- G. Generar la o las máquinas necesarias dando clic derecho sobre la carpeta creada
- H. Genera los puntos de medición dando clic derecho sobre la máquina creada
- I. Generar los espectros y las formas de onda dando clic derecho sobre los puntos de medición.

2.3.3.3. *Proceso para cargar la ruta al equipo*

- A. Encender el Vibracheck 200
- B. Con los botones de desplazamiento dirigirse al icono COMUNICAR
- C. En una PC ejecutar el programa MAINTraq Predictive
- D. Conectar la PC al Vibracheck 200 utilizando el cable de adquisición de datos y verificar el cambio de estado de la pantalla del equipo a CONECTADO
- E. Seleccionar el fichero Envío de Datos
- F. Seleccionar el fichero Máquinas
- G. Seleccionar la máquina que se desea cargar
- H. Seleccionar el fichero Agregar la máquina o ruta a la lista
- I. Seleccionar el fichero Enviar al Colector de datos

2.3.3.4. *Proceso para realizar la medición de la ruta*

- A. Encender el Vibracheck 200 y conectar el acelerómetro al canal 1
- B. Conectar el acelerómetro en el punto que se desea medir
- C. Con los botones de desplazamiento dirigirse al icono RUTAS
- D. Seleccionar la ruta que se desea registrar
- E. Presionar *Enter* para medir

2.3.3.5. *Proceso para descargar los datos registrados en la ruta*

- A. Encender el Vibracheck 200
- B. Con los botones de desplazamiento dirigirse al icono COMUNICAR
- C. En una PC ejecutar el programa MAINTraq Predictive
- D. Conectar la PC al Vibracheck 200 utilizando el cable de adquisición de datos y verificar el cambio de estado de la pantalla del equipo a CONECTADO
- E. Seleccionar el fichero Recepción de Datos
- F. Seleccionar el fichero Desde Colector de Datos

2.3.4. *Cámara termográfica*

Para realizar la medición de la termografía se debe realizar los siguientes pasos:

- A. Encender la cámara termográfica Satir HotFind VR

- B. Retirar la protección del lente
- C. Colocarse a 0,5 metros de distancia del punto de medición
- D. Ajustar el enfoque hasta que el componente sea lo más visible y detallado posible
- E. Pulsar el botón A para que se corrija la escala de temperatura
- F. Pulsar el botón S para congelar la imagen de medición
- G. Pulsar el botón ENTER y seleccionar la opción archivo y seleccionar conservar
- H. Copar el código con el que se guarda la imagen
- I. Apagar la cámara termográfica
- J. Extraer la tarjeta de memoria y copiar los archivos
- K. El archivo abrirlo con la aplicación SatirReport y obtener el valor de la temperatura en el punto deseado.

2.4. Pruebas preliminares

2.4.1. Condiciones a considerar al realizar las pruebas

Con la finalidad de estandarizar los valores obtenidos en vibraciones, termografía y calidad de la energía eléctrica, el proceso para realizar cada una de las mediciones debe ser:

- Colocar a una distancia de 4 metros los calefactores y con una dirección opuesta al equipo.
- El equipo debe funcionar diez minutos con la carga aplicada antes de realizar las mediciones con la finalidad de que los valores de potencia se estabilicen.
- Durante el tiempo de las mediciones deben encontrarse apagados los diferentes módulos presentes en el laboratorio para evitar una caída de tensión de 1 a 2 V en cada línea.
- Los calefactores deben apagarse antes de realizar el paro del equipo con la finalidad de precautelar el estado de éste.
- Con el equipo apagado se realizan las termografías a una distancia de 0,5 m entre la cámara y el equipo.

2.4.2. Carga suministrada al sistema de generación

El motor eléctrico trifásico jaula de ardilla de 3.700 W a utilizarse se encuentra acoplado a un sistema de generación, para aplicar una carga en el sistema de generación se utilizan dos calentadores de 1.500 W cada uno, de los cuales el primero trabaja a plena potencia y el segundo se lo utiliza con una carga menor. La potencia obtenida entre los dos generadores es de 1 980 W,

además hay que añadir la potencia generada por la inercia propia del generador.

Mediante la utilización del analizador de la calidad de la energía Fluke 435-II, se cuantifico la potencia activa del motor alineado al tener aplicado la carga anteriormente señalada en 2,974 kW, por lo cual el motor alineado trabaja a un 80,38% de carga nominal.

2.4.3. Estandarización de valores de desalineación obtenidos con el alineador láser

Los valores obtenidos con el alineador de ejes láser varían entre mediciones, lo que genera un rango al momento de obtener los resultados, para lo cual se han realizado 15 mediciones en el mismo punto con una desalineación cercana a los valores de tolerancia, los valores obtenidos de cada medición son:

Tabla 1-2: Valores obtenidos con el alineador de ejes láser Optaling Plus

Medición	Desalineación			
	Paralela vertical (mm)	Paralela horizontal (mm)	Angular vertical (mm)	Angular horizontal (mm)
1	0,04	0,04	0,01	0,05
2	0,04	0,07	0,01	0,04
3	0,06	0,09	0,01	0,06
4	0,04	0,07	0,01	0,05
5	0,05	0,08	0,01	0,06
6	0,04	0,08	0,01	0,05
7	0,05	0,07	0,01	0,05
8	0,05	0,09	0,01	0,06
9	0,05	0,09	0,01	0,06
10	0,07	0,09	0,01	0,06
11	0,05	0,08	0	0,05
12	0,07	0,09	0,01	0,06
13	0,04	0,08	0	0,04
14	0,05	0,09	0	0,05
15	0,05	0,09	0	0,05

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

Para encontrar los valores de máximos y mínimos que pueden tomar las mediciones se utiliza la desviación estándar obtenidos de los datos de la Tabla 1-2, además de la utilización del programa Excel para reducir errores por aproximaciones en los valores.

Para encontrar la desviación estándar se utiliza la fórmula +DESVESTA(). Donde los resultados son los siguientes:

Tabla 2-2: Tolerancias obtenidas en los diferentes puntos de desalineación

Tipo de desalineación	Tolerancia (mm)
Desalineación paralela vertical	$\pm 0,010$
Desalineación paralela horizontal	$\pm 0,014$
Desalineación angular vertical	$\pm 0,005$
Desalineación angular horizontal	$\pm 0,007$

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

Para los valores obtenidos durante la investigación se debe tomar en cuenta que éstos pueden ser mayores o menores dependiendo de la tolerancia con la que se encuentra trabajando el equipo de medición para lo cual se debe tomar en cuenta la Tabla 2-2.

2.4.4. Frecuencia natural del equipo

Para realizar las mediciones de la frecuencia natural en los diferentes planos del motor y generador es necesario alinear al equipo y anotar los valores finales de la desalineación, los que son:

- Desalineación paralela de 0,03 mm
- Desalineación angular de 0,02 mm

Al realizar el proceso descrito en el literal 2.3.3.1 se obtienen los siguientes espectros, valores de la frecuencia fundamental y la amplitud total rms de cada plano o lado de los equipos.

La frecuencia natural obtenida en el lado vertical del motor (LVM) es de 38,6 Hz y ninguno de sus armónicos se aproxima a los 60 Hz de funcionamiento del equipo. Ver Gráfico 1-2

La frecuencia natural obtenida en el lado horizontal del motor (LHM) es de 75,7 Hz y los armónicos de ésta superan los 60 Hz de funcionamiento del equipo. Ver Gráfico 2-2

La frecuencia natural obtenida en el lado axial del motor (LAM) es de 9,2 Hz y ninguno de sus armónicos se aproxima a los 60 Hz de funcionamiento del equipo. Ver Gráfico 3-2

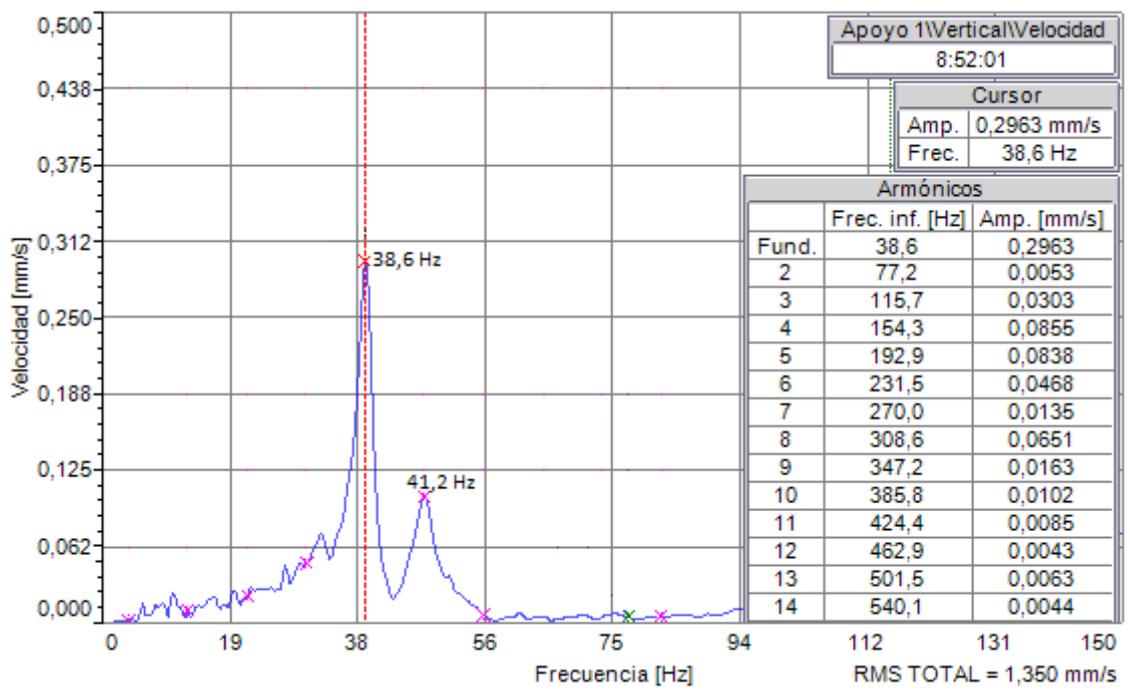


Gráfico 1-2: Frecuencia natural LVM

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

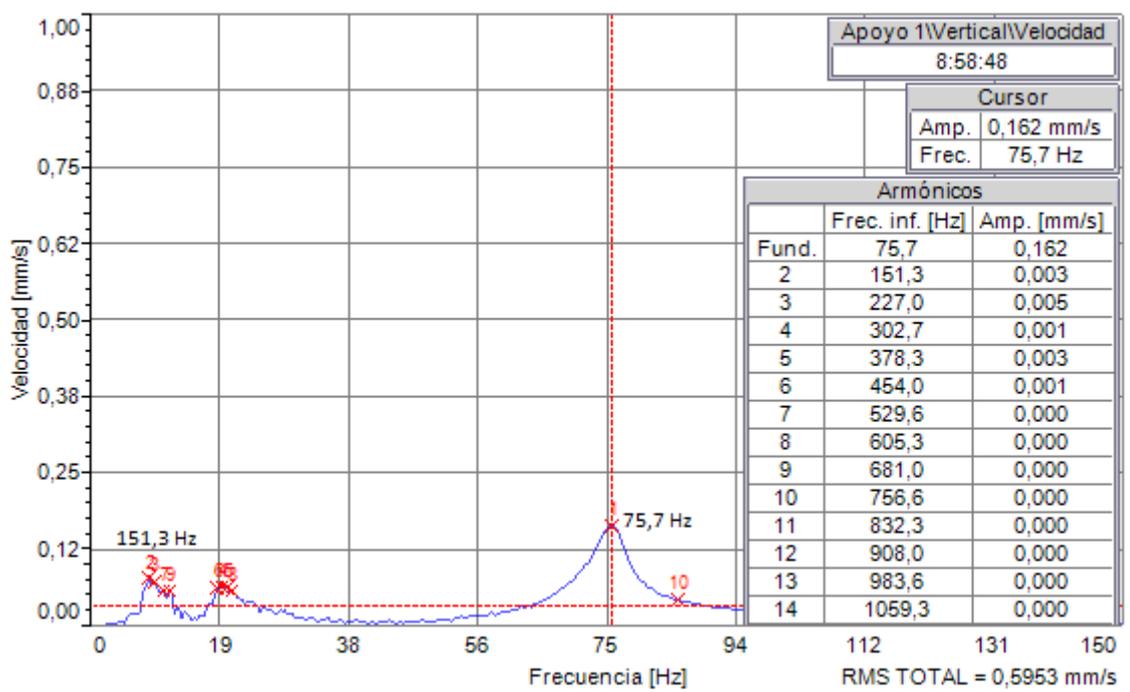


Gráfico 2-2: Frecuencia natural LHM

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

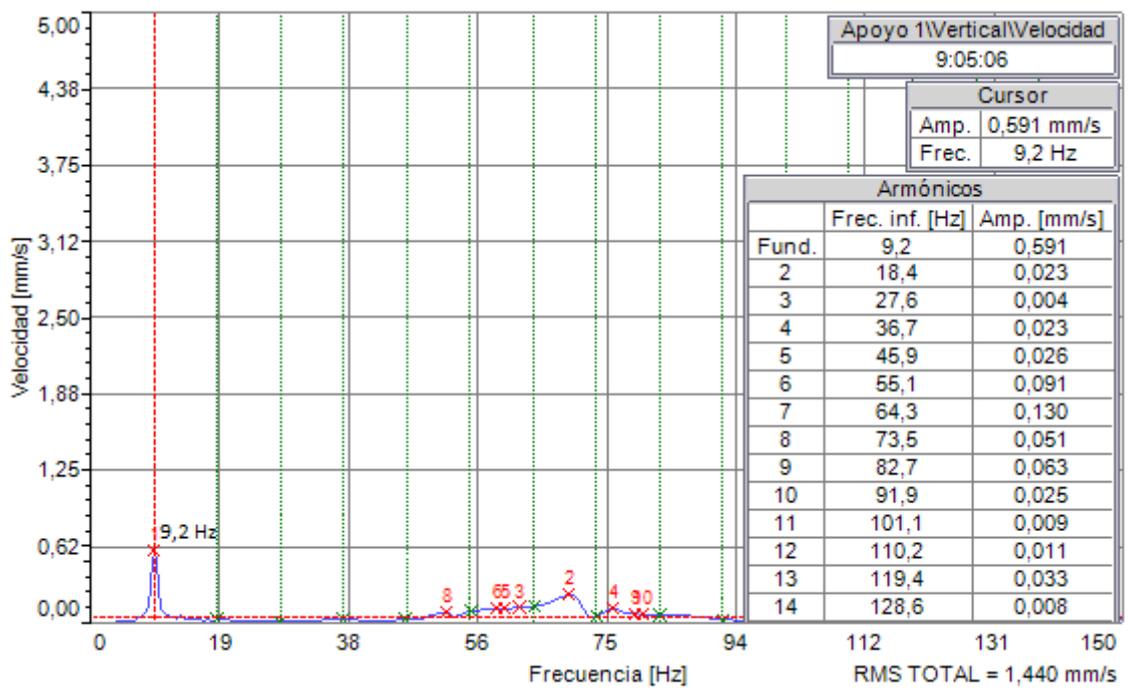


Gráfico 3-2: Frecuencia natural LAM

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

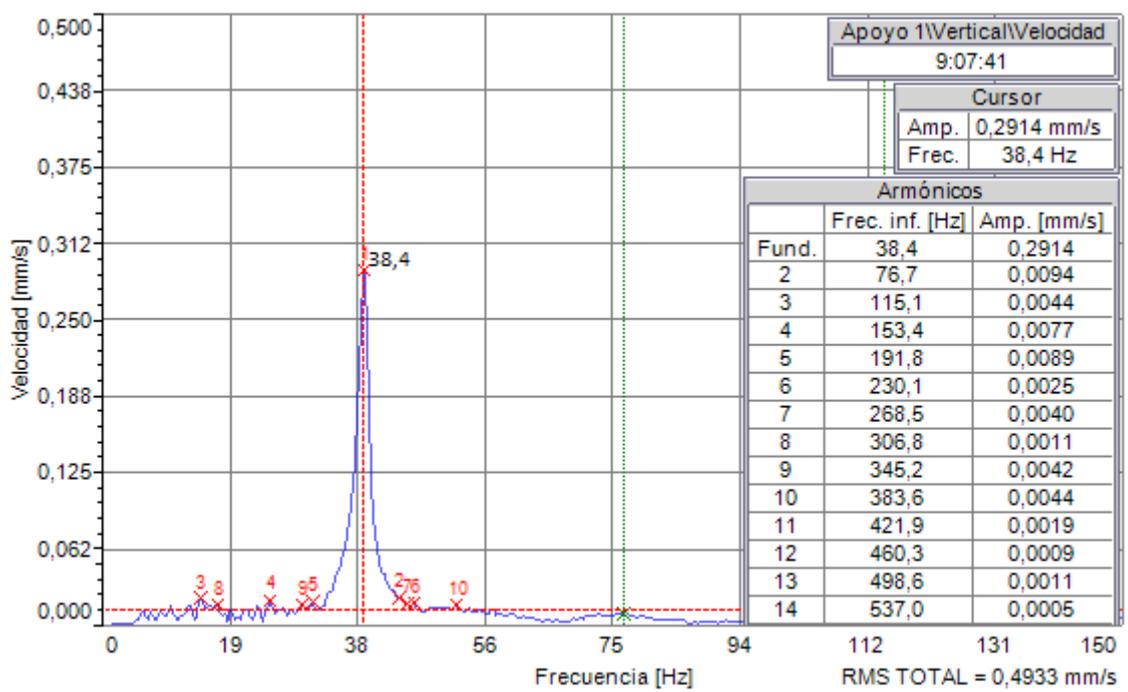


Gráfico 4-2: Frecuencia natural LVG

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

La frecuencia natural obtenida en el lado vertical del generador (LVG) es de 38,4 Hz y ninguno de sus armónicos se aproxima a los 60 Hz de funcionamiento del equipo.

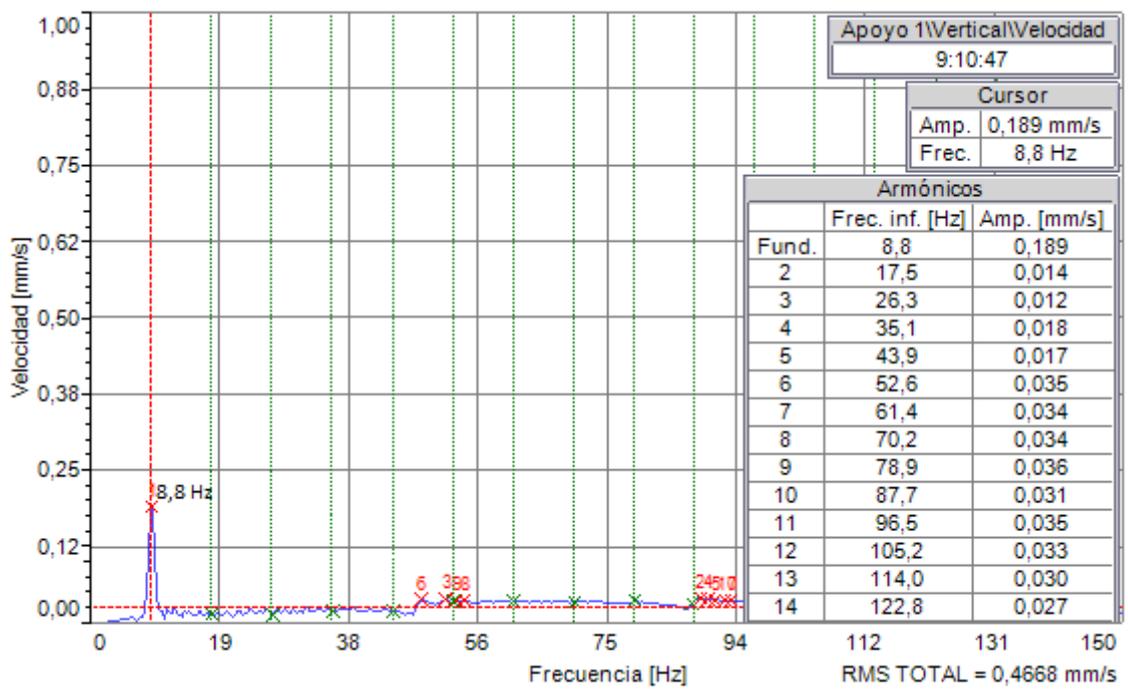


Gráfico 5-2: Frecuencia natural LHG

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

La frecuencia natural obtenida en el lado horizontal del generador (LHG) es de 8,8 Hz y únicamente el séptimo armónico que posee una frecuencia de 61,4 se aproxima a los 60 Hz de funcionamiento del equipo.

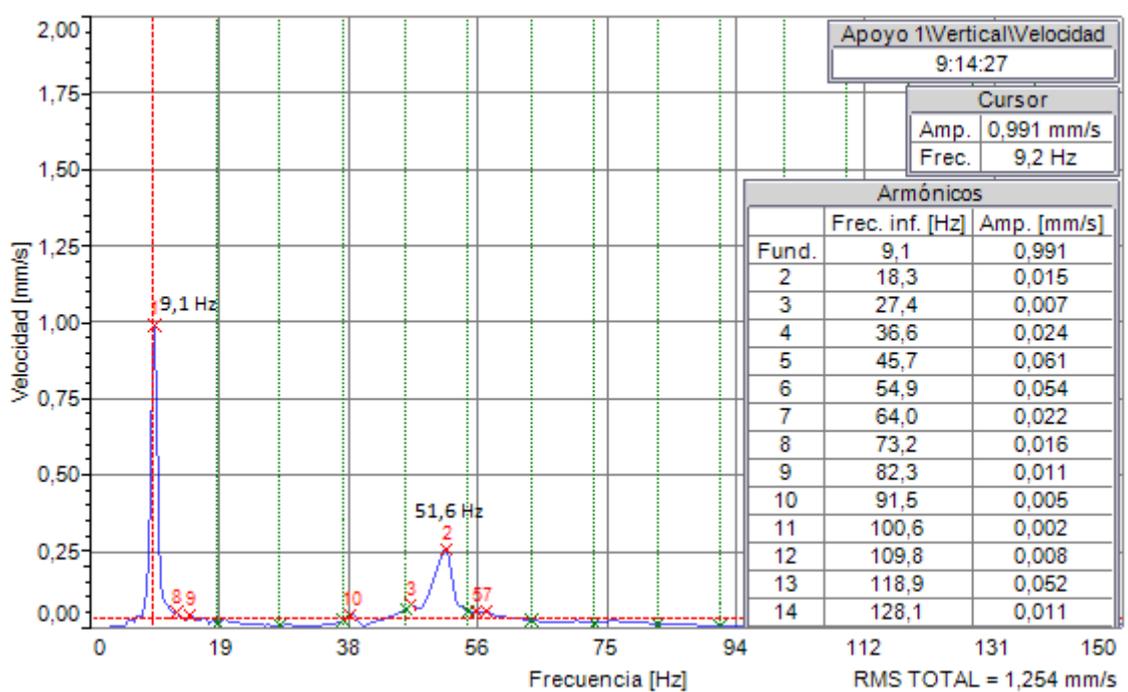


Gráfico 6-2: Frecuencia natural LAG

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

La frecuencia natural obtenida en el lado axial del generador (LAG) es de 9,1 Hz y ninguno de sus armónicos se aproxima a los 60 Hz de funcionamiento del equipo.

Las frecuencias naturales descritas en la Tabla 3-2. Son diferentes a la frecuencia de funcionamiento del equipo que es de 60 Hz, por lo cual el motor y el generador no se encuentran trabajando en resonancia. A menos que, la frecuencia de trabajo se eleve a 61,4 Hz, en la cual se genera una resonancia en el generador, específicamente en el lado horizontal.

De acuerdo con los espectros de velocidad medidos en cada punto del motor y generador indica los siguientes datos:

Tabla 3-2: Resumen de los valores obtenidos de las frecuencias naturales

Equipo	Punto de medición	Frecuencia (hz)	Rms total (mm/s)
Motor	Lado vertical	38,6	1,3500
	Lado horizontal	75,7	0,5953
	Lado axial	9,2	1,4400
Generador	Lado vertical	38,4	0,4933
	Lado horizontal	8,8	0,4668
	Lado axial	9,1	1,254

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

2.4.5. Temperatura de los elementos con el equipo alineado

Para conocer el incremento de temperatura en los equipos y acoples generado al encontrarse desalineado un equipo, se debe tener en cuenta la temperatura de los componentes al momento del equipo estar alineado, para lo cual se inicia la toma de los datos de temperatura del equipo al tener el acople tipo mandíbula al presentar los siguientes valores de desalineación:

- Desalineación paralela de 0,02 mm
- Desalineación angular de 0 mrad

Los puntos de medición que se van a tomar en cuenta se encuentran señalados en la Figura 7-2, además de tomar en cuenta el elemento elastomérico del acople tipo mandíbula. Los puntos de medición son:

- **T1.** – tapa del motor.
- **T2.** – eje del motor.
- **T3.** – masa acople – motor.
- **T4.** – masa acople – generador.

- **T5.** – eje acople – generador.
- **T6.** – eje generador
- **T7.** – tapa del generador
- **T8.** – elemento elastomérico

Los resultados de la termografía son compilados del **ANEXO A.**

Tabla 4-2: Temperatura en puntos de medición del acople tipo mandíbula alineado

Puntos de medición	Temperatura del elemento (°C)	Temperatura ambiente (°C)	ΔT_1 (°C)
T ₁	55,5	21	34,5
T ₂	59,5	21	38,1
T ₃	48,7	21	27,7
T ₄	39,2	21	18,2
T ₅	42,6	21	21,6
T ₆	45,5	21	24,5
T ₇	34,4	21	13,4
T ₈	43	21	22

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

Los valores de desalineación con los que se realizó la primera medición del acople tipo dona son:

- Desalineación paralela de 0,02 mm
- Desalineación angular de 0,0857 mrad

Los puntos de medición a tomarse en cuenta son los mismo que los tomados para el acople tipo mandíbula.

Los resultados de la termografía son compilados del **ANEXO B.**

Tabla 5-2: Temperatura en puntos de medición del acople tipo dona

Puntos de medición	Temperatura del elemento (°C)	Temperatura ambiente (°C)	ΔT_2 (°C)
T ₁	21,1	22	30,1
T ₂	58,9	22	36,9
T ₃	47,9	22	25,9
T ₄	35,5	22	13,5
T ₅	39,7	22	17,7
T ₆	45,4	22	23,4
T ₇	35	22	13
T ₈	36,4	22	14,4

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

Los valores de desalineación con los que se realizó la primera medición del acople con cubierta de poliuretano son:

- Desalineación paralela de 0 mm
- Desalineación angular de 0 mrad

Los puntos de medición a tomarse en cuenta son los siguientes:

- **T1.** – tapa del motor.
- **T2.** – masa acople – motor.
- **T3.** – masa acople – generador.
- **T4.** – eje acople – generador.
- **T5.** – eje generador
- **T6.** – tapa del generador
- **T7.** – elemento elastomérico

Los resultados de la termografía son compilados del **ANEXO C**.

Tabla 6-2: Temperatura en puntos de medición del acople con cubierta de poliuretano

Puntos de medición	Temperatura del elemento (°C)	Temperatura ambiente (°C)	ΔT_2 (°C)
T ₁	49,6	22	27,6
T ₂	52,4	22	30,4
T ₃	35,2	22	13,2
T ₄	39,3	22	17,3
T ₅	44,9	22	22,9
T ₆	34,2	22	12,2
T ₇	33,5	22	11,5

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

2.5. Obtención de valores de desalineamiento y consumo energético

2.5.1. Cálculo del tamaño de la muestra

2.5.1.1. Cálculo del tamaño de la muestra en las mediciones de calidad de la energía

Para realizar el cálculo de la muestra el equipo se utiliza el acople tipo mandíbula con los siguientes valores de desalineación:

- Desalineación paralela de 0,03 mm
- Desalineación angular de 0,02 mm
-

El número de mediciones que se tomaron es de 34 para las cuales se realizó una adquisición de datos cada 10 segundos, por un tiempo aproximado de 5 minutos con 40 segundos, los datos obtenidos son:

Tabla 7-2: Mediciones de potencia activa con el equipo alineado

N°	Potencia activa (kW)	N°	Potencia activa (kW)
1	3	18	2,97
2	3	19	2,97
3	2,97	20	2,97
4	2,97	21	2,97
5	3	22	2,97
6	2,97	23	2,97
7	2,97	24	2,97
8	2,97	25	2,97
9	2,97	26	2,97
10	2,97	27	2,97
11	2,97	28	2,97
12	2,97	29	2,97
13	2,97	30	2,97
14	2,97	31	2,97
15	2,97	32	2,97
16	2,97	33	2,97
17	3	34	2,97

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

Con los datos se procede a utilizar la fórmula 1 para lo cual se debe tomar en cuenta los siguientes pasos en Excel para obtener el valor de los datos de la fórmula para la muestra cuando la población es infinita. Los pasos son:

- La probabilidad de ocurrencia se colocó $P(A) = 0,999$
- Cálculo de Z se utiliza la fórmula $+INV.NORM.ESTAND(P(A))$
- Cálculo de $Z_{\alpha/2}$ se utiliza la fórmula $+INV.NORM.ESTAND(PROMEDIO(1;Z))$
- Cálculo de la desviación estándar de los valores se utiliza la fórmula $+DESVESTA()$
- Error se utiliza $e = 0,0095$
- Con los datos obtenidos en el paso 3, 4 y 5 se procede a remplazar los valores en Excel con la fórmula: $+((Z_{\alpha/2} * s) / e) ^ 2$

Al aplicar el procedimiento anteriormente descrito se obtiene el valor de la muestra de 11,55 mediciones, la cual se debe aproximar a 12 mediciones.

2.6. Aplicación del método de regresión lineal múltiple

Para realizar el cálculo de la regresión lineal múltiple en la aplicación R Studio:

- A. Se debe realizar es una base de datos que contenga las variables dependientes e independientes a ser analizadas.
- B. Leer la base de datos creado un objeto que contenga las variables de análisis utilizando el comando de la siguiente estructura: `PARALELA<-read.xlsx("potparalelam.xlsx")`.
- C. Analizar si las variables a ser analizadas son de tipo numérica mediante el comando: `sapply(PARALELA, class)`.
- D. Generar la estructura del modelo de regresión lineal múltiple con el comando: `REGRESION<- lm(POTPM~DPM+VPM),PARALELA)`.
- E. Obtener los coeficientes mediante el comando: `summary(REGRESION)`.
- F. Determinar si la significancia de cada variable aporta al modelo matemático, de no ser el caso eliminar el valor con Pr mayor y repetir el inciso 4.
- G. En la fórmula 2 remplazar los valores obtenidos en el paso anterior, donde B_0 es el valor de la intercepción, B_1 en el valor de la variable x_1 y B_2 en el valor de la variable x_2 .

Las líneas de código para cada acople y para cada tipo de desalineación se encuentran descritas en el **ANEXO D**.

CAPÍTULO III

3. RESULTADOS

3.1. Realizar la regresión lineal múltiple para cada uno de los tipos de acoples flexibles utilizados

3.1.1. Regresión lineal múltiple del acople tipo mandíbula

3.1.1.1. Desalineación paralela

Lo primero que se debe realizar es la identificación de las variables independientes como la vibración en la cual se tienen 2 puntos de medición en el motor y 2 en el generador, de éstos se debe buscar el que mejor se caracterice para tomar los valores de la amplitud global de vibraciones rms.

De los 4 puntos en los que se realizó la medición, los espectros presentados en el lado horizontal motor, presentan un incremento constante del segundo armónico lo que es característico en la desalineación paralela, como se puede observar en el siguiente gráfico:

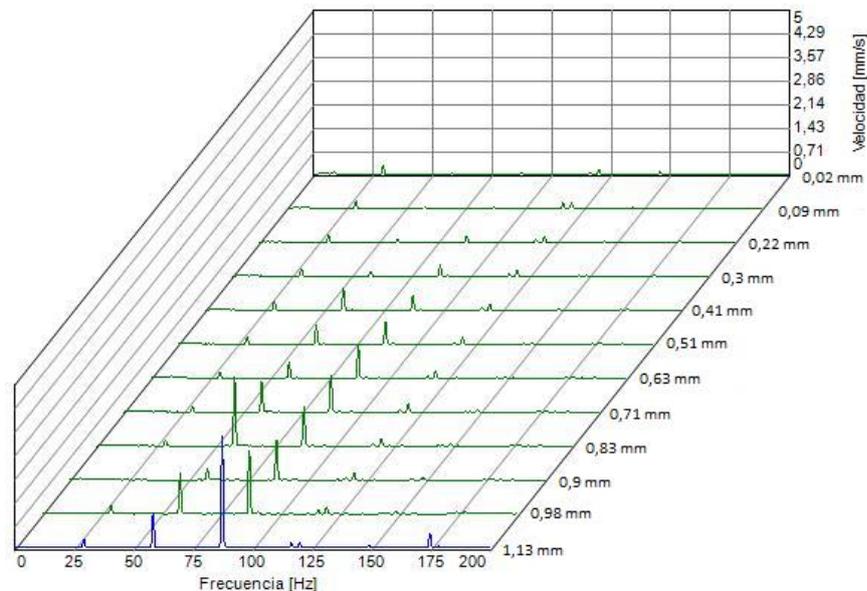


Gráfico 1-3: Armónicos presentes en la desalineación paralela del AtM en el LHM

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

Con la identificación de la variable independiente de las vibraciones, se procede a realizar una

tabla que contenga las variables independientes de la desalineación y vibraciones, además de la variable dependiente del consumo energético.

Tabla 1-3: Valores de desalineación paralela, vibraciones y consumo energético del AtM

Desalineación (mm)	VTV rms en el LHM (mm/s)	Potencia (kW)
0,02	0,439	2,970
0,09	0,457	2,978
0,22	0,483	2,980
0,3	0,578	2,985
0,41	0,969	2,988
0,51	1,027	3,011
0,63	1,253	3,000
0,71	1,567	3,013
0,83	2,516	3,007
0,9	1,441	3,014
0,98	2,512	3,030
1,13	3,711	3,030

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

Para hallar los valores del a intercepción y de las 2 variables, se aplica el procedimiento descrito en la Sección 2.6. con lo que se obtienen los siguientes valores:

Tabla 2-3: Valores de coeficientes de regresión desalineación paralela

Coefficiente de regresión	Valor
B ₀	2,9706
B ₁	0,0571
B ₂	-0,0015

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

Con los valores de la tabla 2-3 se substituyen en la ecuación 2, lo que muestra la ecuación característica:

$$P=2,9706 + 0,0571 D_p - 0,0015 V_{LHM}$$

Donde:

D_p = Desalineación paralela (mm)

V_{LHM} = Velocidad total de vibraciones del LHM (mm/s)

De la ecuación obtenida para la potencia se determina que en una situación en la que no existe el fenómeno de la desalineación ni vibraciones el consumo energético tendría un valor de 2,9706

kW.

```
> cor.test(VPM,DPM)
```

Pearson's product-moment correlation

```
data: VPM and DPM  
t = 7.2787, df = 10, p-value = 2.667e-05  
alternative hypothesis: true correlation is not equal to 0  
95 percent confidence interval:  
 0.7247794 0.9768798  
sample estimates:  
      cor  
0.9171787
```

Gráfico 2-3: Correlación variables independientes en desalineación paralela AtM

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

Con el valor de $p\text{-value} = 2,667e-05$ del gráfico 2-3 se tiene evidencia suficiente de una correlación entre las variables independientes de desalineación y vibraciones, por tal razón el modelo puede ser representado por la desalineación.

3.1.1.2. Desalineación angular

Lo primero que se debe hacer es la identificación de las variables independientes como la vibración en la cual se tienen 2 puntos de medición en el plano axial, tanto en el motor como en el generador.

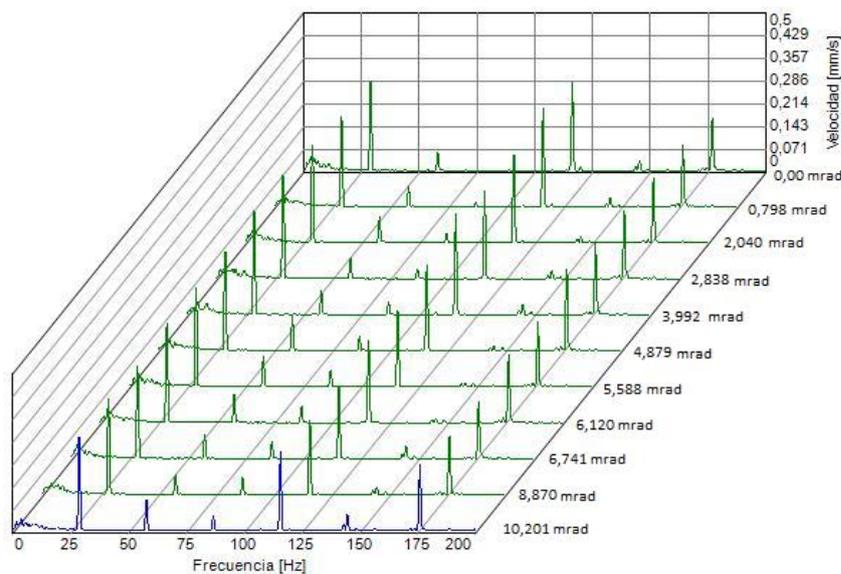


Gráfico 3-3: Armónicos presentes en la desalineación angular del AtM en el LAG

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

De los 2 puntos en los que se realizó la medición, los espectros presentados en el lado axial del generador, presentan un incremento constante del primer y segundo armónico lo que es característico en la desalineación angular, como se observa en el siguiente gráfico 3-3.

Con la identificación de la variable independiente de las vibraciones, se procede a realizar una tabla que contenga las variables independientes de la desalineación y vibraciones, además de la variable dependiente del consumo energético.

Tabla 3-3: Valores de desalineación angular, vibraciones y consumo energético del AtM

Desalineación (mrad)	VTV rms en el LAG (mm/s)	Potencia (kW)
0,000	0,466	2,97
0,798	0,48	2,97
2,040	0,508	2,97
2,838	0,524	2,97
3,992	0,536	2,97
4,879	0,565	2,97
5,588	0,554	2,97
6,120	0,507	3
6,741	0,524	3
7,717	0,48	3
8,870	0,489	3
10,201	0,489	3

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

Para hallar los valores de la intercepción y de las 2 variables, se aplica el procedimiento descrito en la sección 2.6. con lo que se obtienen los siguientes valores:

Tabla 4-3: Valores de coeficientes de regresión desalineación angular

Coefficiente de regresión	Valor
B ₀	3,0585
B ₁	0,0034
B ₂	-0,1802

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

Con los valores de la tabla 4-3 se substituyen en la ecuación 2, lo que muestra la ecuación característica:

$$P = 3,0585 + 0,0034 D_A - 0,1802 V_{LAG}$$

Donde:

D_A = Desalineación angular (mrad)

V_{LAG} = Velocidad total de vibraciones del LAG (mm/s)

De la ecuación obtenida para la potencia se determina que en una situación en la que no existe el fenómeno de la desalineación ni vibraciones el consumo energético tendría un valor de 3,0585 kW.

```
> cor.test(VAM,DAM)
```

Pearson's product-moment correlation

```
data: VAM and DAM
t = 0.18551, df = 10, p-value = 0.8565
alternative hypothesis: true correlation is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 -0.5332615  0.6118988
sample estimates:
      cor
0.05856262
```

Gráfico 4-3: Correlación variables independientes en desalineación angular AtM

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

Con el valor de $p\text{-value} = 0,8565$ del gráfico 4-3 se tiene evidencia suficiente de la ausencia de una correlación entre las variables independientes de desalineación y vibraciones, por tal razón las mismas son significativas.

3.1.1.3. Desalineación combinada

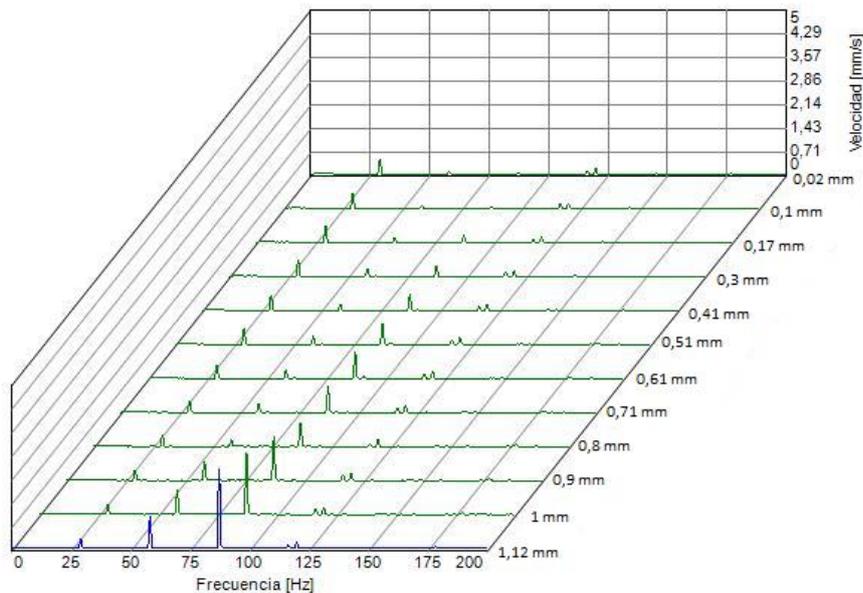


Gráfico 5-3: Armónicos presentes en la desalineación combinada del AtM en el LHM

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

La desalineación combinada presenta las formas de espectros en los planos axial y radial, en este tipo de desalineación se puede dividir sus componentes en 2 (paralela y angular) para tener una mejor caracterización de los datos.

Lo primero que se debe hacer es la identificación de las variables independientes como la vibración en la cual se tienen 4 puntos de medición para la desalineación paralela y 2 puntos de medición para la desalineación angular.

De los 4 puntos en los que se realizó la medición, los espectros presentados en el lado horizontal motor, presentan un incremento constante del segundo armónico lo que es característico en la desalineación paralela, como se pudo observar en el gráfico 5-3.

De los 2 puntos en los que se realizó la medición, los espectros presentados en el lado axial del generador, presentan un incremento constante del primer y segundo armónico lo que es característico en la desalineación angular, como se puede observar en el siguiente gráfico:

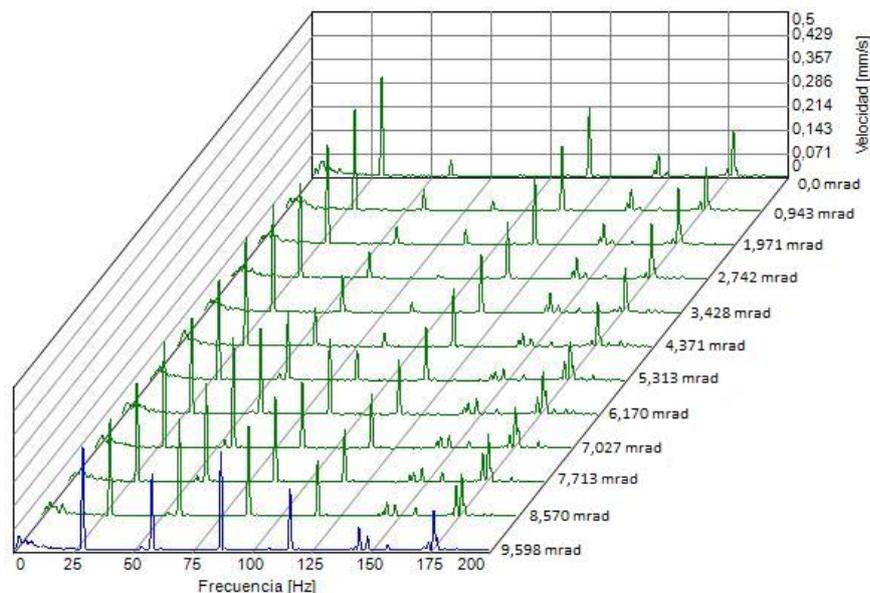


Gráfico 6-3: Armónicos presentes en la desalineación combinada del AtM en el LAG

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

Al tener identificado los dos planos de vibraciones con los que se va a trabajar se procede a realizar una tabla que permita relacionar la desalineación, las vibraciones y cada una de estas con el consumo energético, debido a que a nivel empresarial se pueden utilizar los equipos de alineación o de vibraciones para la detección de desalineación en un sistema.

Tabla 5-3: Valores de desalineación combinada, vibraciones y consumo energético del AtM

Desalineación paralela (mm)	Desalineación angular (mrad)	VTV rms en el LHM (mm/s)	VTV rms en el LAG (mm/s)	Potencia (kW)
0,02	0,000	0,599	0,466	2,970
0,1	0,943	0,615	0,454	2,978
0,17	1,971	0,685	0,465	2,985
0,3	2,742	0,783	0,449	2,978
0,41	3,428	0,83	0,473	3,008
0,51	4,371	0,958	0,473	3,000
0,61	5,313	1,078	0,493	3,003
0,71	6,170	1,052	0,572	3,006
0,8	7,027	1,051	0,622	3,026
0,9	7,713	1,626	0,621	3,026
1	8,570	2,187	0,622	3,027
1,12	9,598	2,797	0,622	3,033

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

A continuación, se realiza un estudio por separado de la desalineación versus el consumo energético y las vibraciones versus el consumo energético, por las razones antes mencionadas.

Para hallar los valores de la intercepción y de las 2 variables de desalineación, se aplica el procedimiento descrito en la **sección 2.6.** con lo que se obtienen los siguientes valores:

Tabla 6-3: Valores de coeficientes de regresión desalineación combinada, relación D vs P

Coefficiente de regresión	Valor
B ₀	2,9714
B ₁	0,0563
B ₂	0,0001

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

Con los valores de la tabla 6-3 se substituyen en la ecuación 2, lo que muestra la ecuación característica:

$$P = 2,9714 + 0,0563 D_P + 0,0001 D_A$$

Donde:

D_P = Desalineación paralela (mm)

D_A = Desalineación angular (mrad)

De la ecuación obtenida para la potencia se determina que en una situación en la que no existe el

fenómeno de la desalineación el consumo energético tendría un valor de 2,9714 kW.

```
> cor.test(DPMC,DAMC)
```

Pearson's product-moment correlation

```
data: DPMC and DAMC
t = 57.987, df = 10, p-value = 5.648e-14
alternative hypothesis: true correlation is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 0.9945305 0.9995981
sample estimates:
      cor
0.9985163
```

Gráfico 7-3: Correlación variables independientes D_P vs D_A en el AtM

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

Con el valor de $p\text{-value} = 5,648e-14$ del gráfico 7-3 se tiene evidencia suficiente de una correlación entre las variables independientes de desalineación, por tal razón el modelo puede ser representado una de las mismas.

Para hallar los valores de la intercepción y de las 2 variables de vibraciones, se aplica el procedimiento descrito en la sección 2.6. con lo que se obtienen los siguientes valores:

Tabla 7-3: Valores de coeficientes de regresión desalineación combinada, relación V vs P

Coefficiente de regresión	Valor
B_0	2,8868
B_1	0,0077
B_2	0,2032

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

Con los valores de la tabla 7-3 se substituyen en la ecuación 2, lo que muestra la ecuación característica:

$$P = 2,8868 + 0,0077 V_{LHM} + 0,2032 V_{LAG}$$

Donde:

V_{LHM} = Velocidad total de vibraciones del LHM (mm/s)

V_{LAG} = Velocidad total de vibraciones del LAG (mm/s)

De la ecuación obtenida para la potencia se determina que en una situación en la que no existe el fenómeno de vibraciones el consumo energético tendría un valor de 2,8868 kW.

```
> cor.test(VAMC,VHMC)
```

Pearson's product-moment correlation

```
data: VAMC and VHMC  
t = 3.9527, df = 10, p-value = 0.002718  
alternative hypothesis: true correlation is not equal to 0  
95 percent confidence interval:  
 0.3750203 0.9355209  
sample estimates:  
      cor  
0.7808612
```

Gráfico 8-3: Correlación variables independientes V_{LHM} vs V_{LAG} en el AtM

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

Con el valor de $p\text{-value} = 0,002718$ del gráfico 8-3 se tiene evidencia suficiente de una correlación entre las variables independientes de vibración, por tal razón el modelo puede ser representado por una de las mismas.

3.1.2. *Regresión lineal múltiple del acople tipo dona*

3.1.2.1. *Desalineación paralela*

Lo primero que se debe realizar es la identificación de las variables independientes como la vibración en la cual se tienen 2 puntos de medición en el motor y 2 en el generador, de éstos se debe buscar el que mejor se caracterice para tomar los valores de la amplitud global de vibraciones rms.

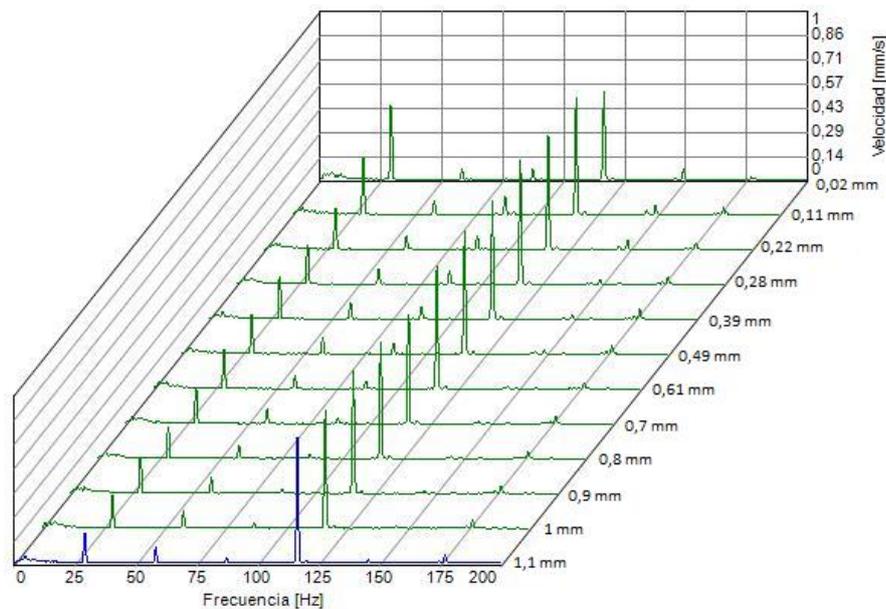


Gráfico 9-3: Armónicos presentes en la desalineación paralela del AtD en el LHG

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

De los 4 puntos en los que se realizó la medición, los espectros presentados en el lado horizontal generador, presentan un incremento constante del segundo armónico lo que es característico en la desalineación paralela, como se pudo observar en el gráfico 9-3.

Tabla 8-3: Valores de desalineación paralela, vibraciones y consumo energético del AtD

Desalineación (mm)	VTV rms en el LHG (mm/s)	Potencia (kW)
0,02	0,737	2,986
0,11	0,814	2,991
0,22	0,755	2,981
0,28	0,811	2,987
0,39	0,778	2,985
0,49	0,8	2,978
0,61	0,795	3,030
0,70	0,762	3,026
0,80	0,77	3,026
0,90	0,783	3,018
1,00	0,768	3,024
1,10	0,792	3,026

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

Con la identificación de la variable independiente de las vibraciones, se procede a realizar una tabla 8-3 que contiene las variables independientes de la desalineación y vibraciones, además de la variable dependiente del consumo energético.

Para hallar los valores del a intercepción y de las 2 variables, se aplica el procedimiento descrito en la Sección 2.6. con lo que se obtienen los siguientes valores:

Tabla 9-3: Valores de coeficientes de regresión desalineación paralela

Coefficiente de regresión	Valor
B ₀	3,0088
B ₁	0,0479
B ₂	-0,0389

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

Con los valores de la tabla 9-3 se substituyen en la ecuación 2, lo que muestra la ecuación característica:

$$P=3,0088 + 0,0479 D_p - 0,0389 V_{LHG}$$

Donde:

D_P = Desalineación paralela (mm)

V_{LHM} = Velocidad del LHG (mm/s)

De la ecuación obtenida para la potencia se determina que en una situación en la que no existe el fenómeno de la desalineación ni vibraciones el consumo energético tendría un valor de 3,0088 kW.

```
> cor.test(VPD,DPD)
```

Pearson's product-moment correlation

```
data: VPD and DPD
t = 0.22818, df = 10, p-value = 0.8241
alternative hypothesis: true correlation is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 -0.5235576  0.6202519
sample estimates:
      cor
0.07196844
```

Gráfico 10-3: Correlación variables independientes en desalineación paralela AtD

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

Con el valor de p-value = 0,8241 del gráfico 10-3 se tiene evidencia suficiente de la ausencia de una correlación entre las variables independientes de desalineación y vibraciones, por tal razón las mismas son significativas.

3.1.2.2. Desalineación angular

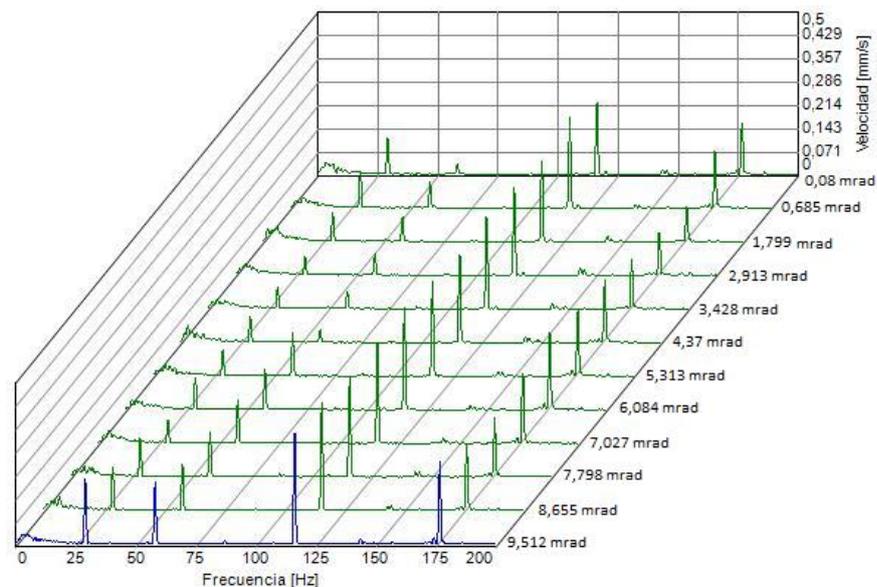


Gráfico 11-3: Armónicos presentes en la desalineación angular del AtD en el LAG

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

Primero que se debe identificar de las variables independientes como la vibración en la cual se tienen 2 puntos de medición en el plano axial, tanto en el motor como en el generador.

De los 2 puntos en los que se realizó la medición, los espectros presentados en el lado axial del generador, presentan un incremento constante del primer y segundo armónico lo que es característico en la desalineación angular, como se pudo observar en el gráfico 11-3.

Con la identificación de la variable independiente de las vibraciones, se procede a realizar una tabla 10-3 que contiene las variables independientes de la desalineación y vibraciones, además de la variable dependiente del consumo energético.

Tabla 10-3: Valores de desalineación angular, vibraciones y consumo energético del AtD

Desalineación (mrad)	VTV rms en el LAG (mm/s)	Potencia (kW)
0,0857	0,354	2,986
0,6856	0,397	2,991
1,7997	0,355	3,029
2,9138	0,367	3,023
3,4280	0,38	3,022
4,3707	0,396	3,019
5,3134	0,433	3,024
6,0847	0,465	3,023
7,0274	0,449	3,027
7,7987	0,438	3,035
8,6557	0,479	3,040
9,5127	0,554	3,041

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

Para hallar los valores de la intercepción y de las 2 variables, se aplica el procedimiento descrito en la sección 2.6. con lo que se obtienen los siguientes valores:

Tabla 11-3: Valores de coeficientes de regresión desalineación angular

Coefficiente de regresión	Valor
B ₀	3,0628
B ₁	0,0078
B ₂	-0,1861

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

Con los valores de la tabla 11-3 se substituyen en la ecuación 2, lo que muestra la ecuación característica:

$$P = 3,0628 + 0,0078 D_A - 0,1861 V_{LAG}$$

Donde:

D_A = Desalineación angular (mrad)

V_{LAG} = Velocidad del LAG (mm/s)

De la ecuación obtenida para la potencia se determina que en una situación en la que no existe el fenómeno de la desalineación ni vibraciones el consumo energético tendría un valor de 3,0628 kW.

```
> cor.test(VAD,DAD)
```

```

Pearson's product-moment correlation

data:  VAD and DAD
t = 6.1086, df = 10, p-value = 0.0001144
alternative hypothesis: true correlation is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 0.6406965 0.9684054
sample estimates:
cor
0.888061

```

Gráfico 12-3: Correlación variables independientes en desalineación angular AtD

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

Con el valor de p-value = 0,0001144 del gráfico 12-3 se tiene evidencia suficiente de una correlación entre las variables independientes de desalineación y vibraciones, por tal razón el modelo puede ser representado por la desalineación.

3.1.2.3. Desalineación combinada

La desalineación combinada presenta las formas de espectros en los planos axial y radial, en este tipo de desalineación se puede dividir sus componentes en 2 (paralela y angular) para tener una mejor caracterización de los datos.

Lo primero que se debe hacer es la identificación de las variables independientes como la vibración en la cual se tienen 4 puntos de medición para la desalineación paralela y 2 puntos de medición para la desalineación angular.

De los 4 puntos en los que se realizó la medición, los espectros presentados en el lado horizontal del generador, presentan un incremento constante del segundo armónico lo que es característico

en la desalineación paralela, como se puede observar en el siguiente gráfico:

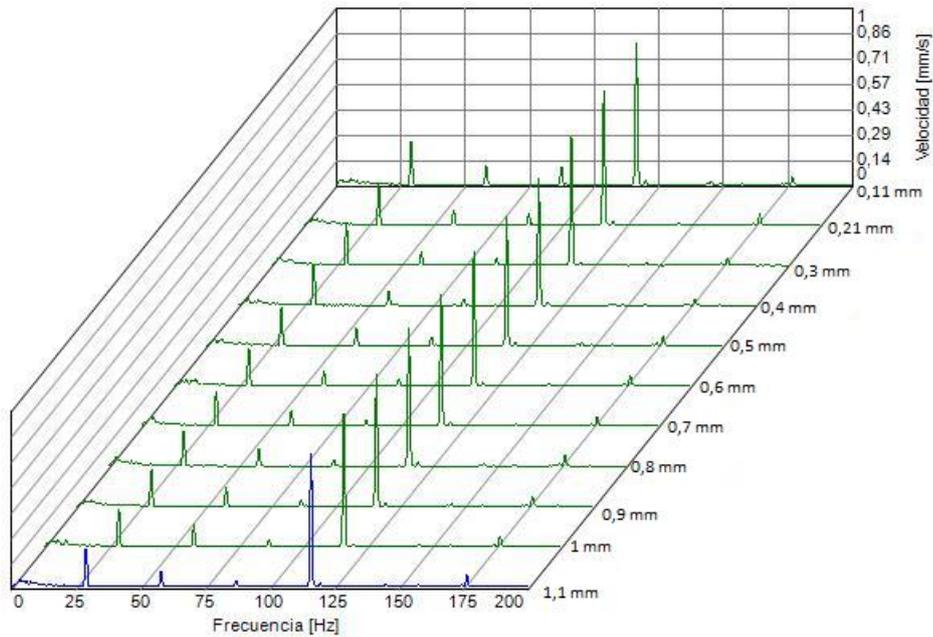


Gráfico 13-3: Armónicos presentes en la desalineación combinada del AtD en el LHG

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

De los 2 puntos en los que se realizó la medición, los espectros presentados en el lado axial del motor, presentan un incremento constante del primer y segundo armónico lo que es característico en la desalineación angular, como se puede observar en el gráfico14-3.

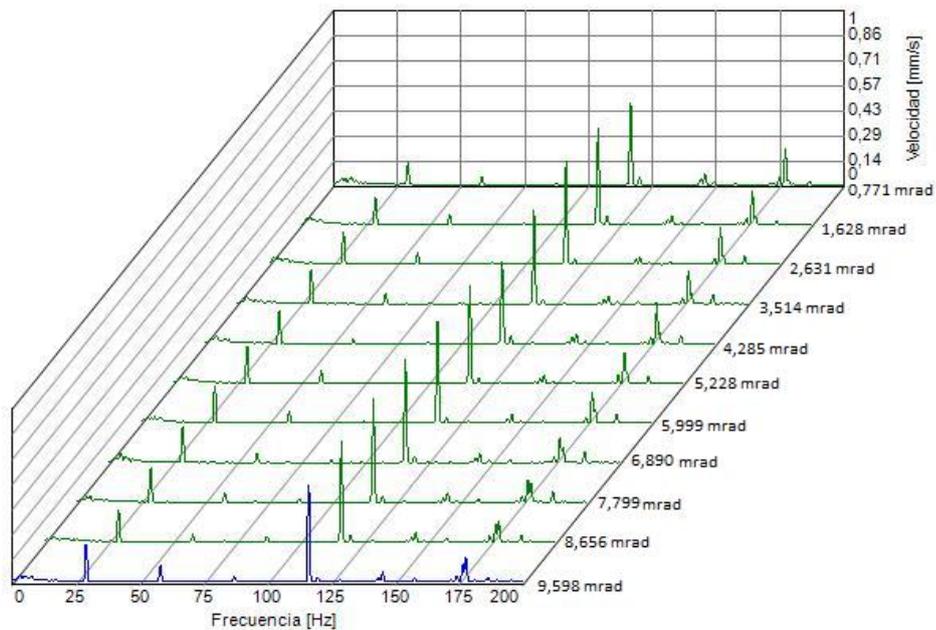


Gráfico 14-3: Armónicos presentes en la desalineación combinada del AtD en el LAM

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

Al tener identificado los dos planos de vibraciones con los que se va a trabajar se procede a realizar una tabla 12-3 que permita relacionar la desalineación, las vibraciones y cada una de estas con el consumo energético, debido a que a nivel empresarial se pueden utilizar los equipos de alineación o de vibraciones para la detección de desalineación en un sistema.

Tabla 12-3: Valores de desalineación combinada, vibraciones y consumo energético del AtD

Desalineación paralela (mm)	Desalineación angular (mrad)	VTV rms en el LHG (mm/s)	VTV rms en el LAM (mm/s)	Potencia (kW)
0,02	0,086	0,777	0,561	2,986
0,11	0,771	0,871	0,609	2,994
0,21	1,628	0,828	0,674	3,003
0,3	2,631	0,793	0,737	3,007
0,4	3,514	0,777	0,707	3,009
0,5	4,285	0,804	0,636	3,015
0,6	5,228	0,828	0,705	3,021
0,7	5,999	0,798	0,741	3,024
0,8	6,890	0,834	0,744	3,030
0,9	7,799	0,805	0,743	3,035
1	8,656	0,818	0,716	3,042
1,1	9,598	0,829	0,77	3,051

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

A continuación, se realiza un estudio por separado de la desalineación versus el consumo energético y las vibraciones versus el consumo energético, por las razones antes mencionadas. Para hallar los valores de la intercepción y de las 2 variables de desalineación, se aplica el procedimiento descrito en la sección 2.6. con lo que se obtienen los siguientes valores:

Tabla 13-3: Valores de coeficientes de regresión desalineación combinada, relación D vs P

Coefficiente de regresión	Valor
B ₀	2,9880
B ₁	0,0380
B ₂	0,0019

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

Con los valores de la tabla 13-3 se substituyen en la ecuación 2, lo que muestra la ecuación característica:

$$P = 2,988 + 0,038 D_p + 0,0019 D_A$$

Donde:

D_P = Desalineación paralela (mm)

D_A = Desalineación angular (mrad)

De la ecuación obtenida para la potencia se determina que en una situación en la que no existe el fenómeno de la desalineación el consumo energético tendría un valor de 2,988 kW.

```
> cor.test(DPDC,DADC)
```

```
Pearson's product-moment correlation
```

```
data: DPDC and DADC  
t = 146.28, df = 10, p-value < 2.2e-16  
alternative hypothesis: true correlation is not equal to 0  
95 percent confidence interval:  
 0.9991374 0.9999368  
sample estimates:  
      cor  
0.9997664
```

Gráfico 15-3: Correlación variables independientes D_P vs D_A en el AtD

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

Con el valor de $p\text{-value} = 2,2e-16$ del gráfico 15-3 se tiene evidencia suficiente de una correlación entre las variables independientes de desalineación, por tal razón el modelo puede ser representado por una de las mismas.

Para hallar los valores de la intercepción y de las 2 variables de vibraciones, se aplica el procedimiento descrito en la sección 2.6. con lo que se obtienen los siguientes valores:

Tabla 14-3: Valores de coeficientes de regresión desalineación combinada, relación V vs P

Coefficiente de regresión	Valor
B_0	2,7665
B_1	0,0962
B_2	0,2492

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

Con los valores de la tabla 14-3 se substituyen en la ecuación 2, lo que muestra la ecuación característica:

$$P = 2,7665 + 0,0962 V_{LHG} + 0,2492 V_{LAM}$$

Donde:

V_{LHM} = Velocidad total de vibraciones del LHG (mm/s)

V_{LAG} = Velocidad total de vibraciones del LAM (mm/s)

De la ecuación obtenida para la potencia se determina que en una situación en la que no existe el fenómeno de vibraciones el consumo energético tendría un valor de 2,7665 kW.

```
> cor.test(VADC,VHDC)
```

```
Pearson's product-moment correlation
```

```
data: VADC and VHDC
t = 0.031923, df = 10, p-value = 0.9752
alternative hypothesis: true correlation is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 -0.5670925  0.5806323
sample estimates:
      cor
0.01009439
```

Gráfico 16-3: Correlación variables independientes V_{LHM} vs V_{LAG} en el AtD

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

Con el valor de $p\text{-value} = 0,9752$ del gráfico 16-3 se tiene evidencia suficiente de la ausencia de una correlación entre las variables independientes de vibraciones, por tal razón las mismas son significativas.

3.1.3. *Regresión lineal múltiple del acople con cubierta de poliuretano*

3.1.3.1. *Desalineación paralela*

Lo primero que se debe realizar es la identificación de las variables independientes como la vibración en la cual se tienen 2 puntos de medición en el motor y 2 en el generador, de éstos se debe buscar el que mejor se caracterice para tomar los valores de la amplitud global de vibraciones rms.

De los 4 puntos en los que se realizó la medición, los espectros presentados en el lado horizontal generador, presentan un incremento constante del segundo armónico lo que es característico en la desalineación paralela, como se puede observar en el gráfico 17-3.

Con la identificación de la variable independiente de las vibraciones, se procede a realizar la tabla 15-3 que contenga las variables independientes de la desalineación y vibraciones, además de la variable dependiente del consumo energético.

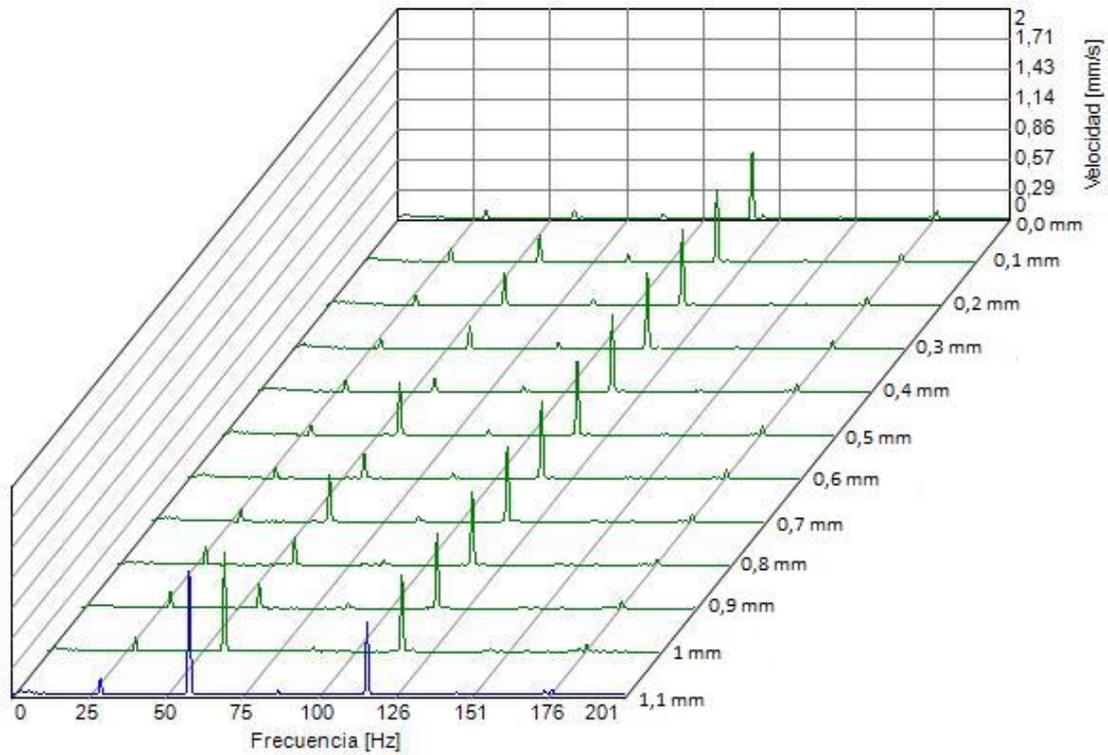


Gráfico 17-3: Armónicos presentes en la desalineación paralela del ACP en el LHG

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

Tabla 15-3: Valores de desalineación paralela, vibraciones y consumo energético del ACP

Desalineación (mm)	VTV en el LHG (mm/s)	Potencia (kW)
0,00	0,696	2,985
0,10	0,797	2,994
0,20	0,806	2,994
0,30	0,789	3,004
0,40	0,778	3,000
0,50	0,926	3,008
0,60	0,824	3,009
0,70	0,901	3,009
0,80	0,814	3,015
0,90	0,790	3,015
1,00	1,220	3,025
1,10	1,395	3,031

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

Para hallar los valores del a intercepción y de las 2 variables, se aplica el procedimiento descrito en la Sección 2.6. con lo que se obtienen los siguientes valores:

Tabla 16-3: Valores de coeficientes de regresión desalineación paralela

Coeficiente de regresión	Valor
B ₀	2,9768
B ₁	0,0289
B ₂	0,0164

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

Con los valores de la tabla 16-3 se substituyen en la ecuación 2, lo que muestra la ecuación característica:

$$P = 2,9768 + 0,0289 D_p + 0,0164 V_{LHG}$$

Donde:

D_p = Desalineación paralela (mm)

V_{LHM} = Velocidad del LHG (mm/s)

De la ecuación obtenida para la potencia se determina que en una situación en la que no existe el fenómeno de la desalineación ni vibraciones el consumo energético tendría un valor de 2,9768 kW.

```
> cor.test(VPP,DPP)
```

```
Pearson's product-moment correlation
```

```
data: VPP and DPP  
t = 3.3282, df = 10, p-value = 0.00764  
alternative hypothesis: true correlation is not equal to 0  
95 percent confidence interval:  
 0.2586687 0.9172361  
sample estimates:  
 cor  
0.724951
```

Gráfico 18-3: Correlación variables independientes en desalineación paralela ACP

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

Con el valor de p-value = 0,00764 del gráfico 18-3 se tiene evidencia suficiente de una correlación entre las variables independientes de desalineación y vibraciones, por tal razón el modelo puede ser representado por la desalineación.

3.1.3.2. Desalineación angular

El punto de medición axial en el motor se descarta debido a las dimensiones de acople y la

dificultad para obtener la medición de forma segura para el equipo y que los datos obtenidos sean fiables. El espectro con el que se trabaja es el obtenido en el lado axial del generador, el que se puede apreciar a continuación:

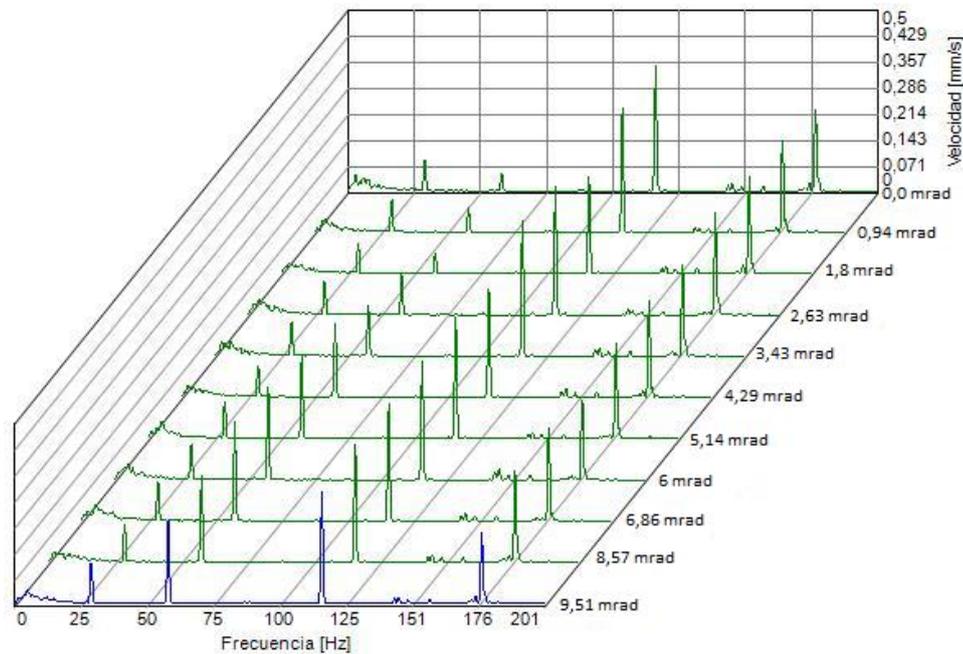


Gráfico 19-3: Armónicos presentes en la desalineación angular del ACP en el LAG

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

Con la identificación de la variable independiente de las vibraciones, se procede a realizar una tabla que contenga las variables independientes de la desalineación y vibraciones, además de la variable dependiente del consumo energético.

Tabla 17-3: Valores de desalineación angular, vibraciones y consumo energético del ACP

Desalineación (mrad)	VTV en el LAG (mm/s)	Potencia (kW)
0,00	0,398	2,985
0,94	0,472	2,995
1,80	0,492	3,003
2,63	0,440	3,007
3,43	0,517	3,011
4,29	0,532	3,009
5,14	0,501	3,015
6,00	0,539	3,014
6,86	0,528	3,015
7,71	0,490	3,018
8,57	0,536	3,021
9,51	0,555	3,021

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

Para hallar los valores de la intercepción y de las 2 variables, se aplica el procedimiento descrito en la sección 2.6. con lo que se obtienen los siguientes valores:

Tabla 18-3: Valores de coeficientes de regresión desalineación angular

Coeficiente de regresión	Valor
B ₀	2,9649
B ₁	0,0025
B ₂	0,0652

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

Con los valores de la tabla 18-3 se substituyen en la ecuación 2, lo que muestra la ecuación característica:

$$P = 2,9649 + 0,0025 D_A - 0,0652 V_{LAG}$$

Donde:

D_A = Desalineación angular (mrad)

V_{LAG} = Velocidad total de vibraciones del LAG (mm/s)

De la ecuación obtenida para la potencia se determina que en una situación en la que no existe el fenómeno de la desalineación ni vibraciones el consumo energético tendría un valor de 2,9649 kW.

```
> cor.test(VAP,DAP)
```

```
Pearson's product-moment correlation
```

```
data: VAP and DAP
t = 3.0072, df = 10, p-value = 0.01318
alternative hypothesis: true correlation is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 0.1905824 0.9050731
sample estimates:
      cor
0.689112
```

Gráfico 20-3: Correlación variables independientes en desalineación angular ACP

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

Con el valor de p-value = 0,01318 del gráfico 20-3 se tiene evidencia suficiente de una correlación entre las variables independientes de desalineación y vibraciones, por tal razón el modelo puede ser representado por la desalineación.

3.1.3.3. Desalineación combinada

La desalineación combinada presenta las formas de espectros en los planos axial y radial, en este tipo de desalineación se puede dividir sus componentes en 2 (paralela y angular) para tener una mejor caracterización de los datos.

Lo primero que se debe hacer es la identificación de las variables independientes como la vibración en la cual se tienen 4 puntos de medición para la desalineación paralela y 1 puntos de medición para la desalineación angular, debido a las dimensiones del acople que impiden la medición en el lado axial del motor.

De los 4 puntos en los que se realizó la medición, los espectros presentados en el lado horizontal del generador, presentan un incremento constante del segundo armónico lo que es característico en la desalineación paralela, como se puede observar en el siguiente gráfico:

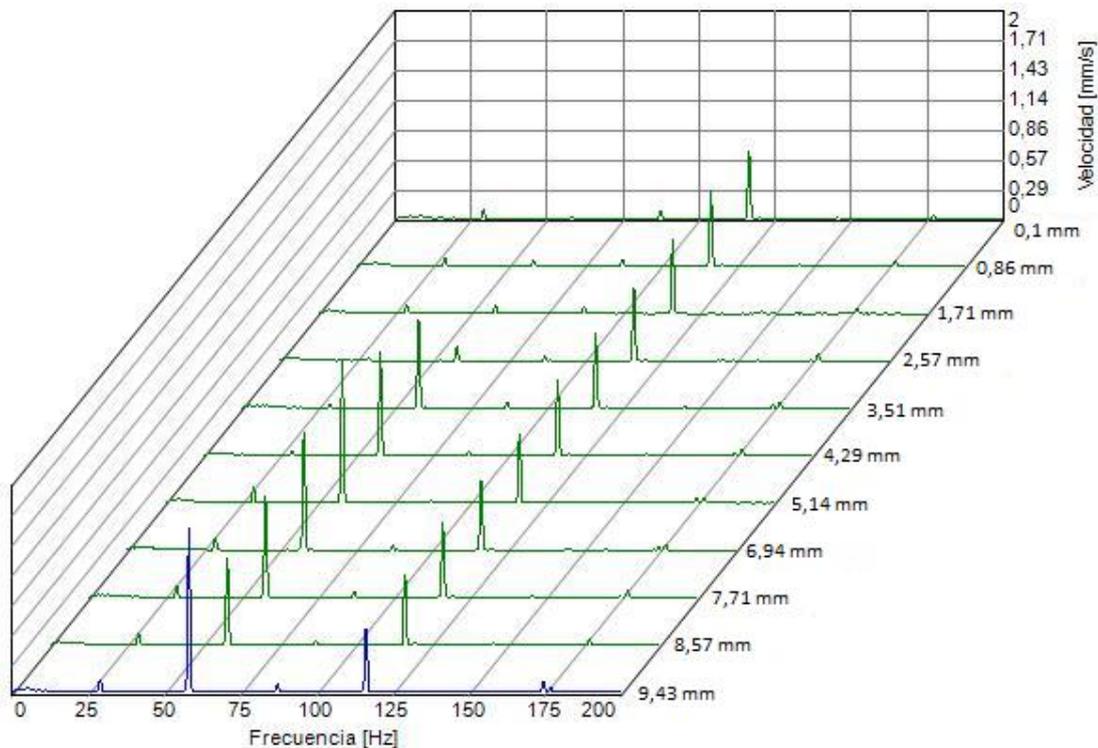


Gráfico 21-3: Armónicos presentes en la desalineación combinada del ACP en el LHG

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

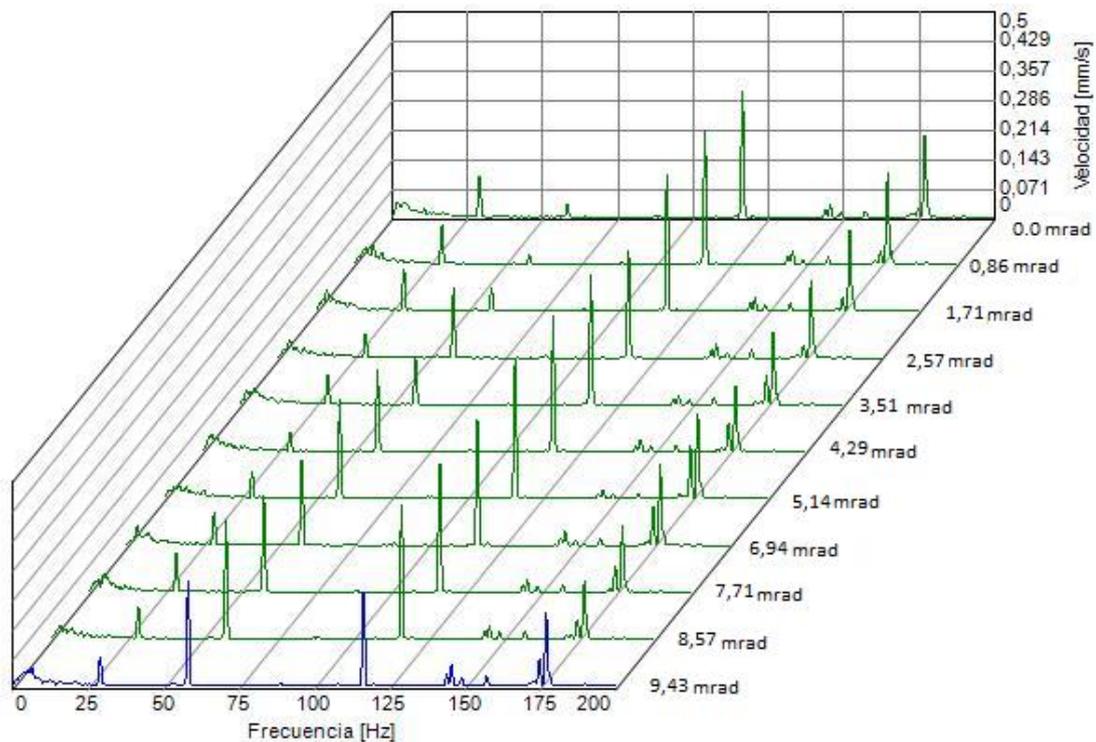


Gráfico 22-3: Armónicos presentes en la desalineación combinada del ACP en el LAG

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

Al tener identificado los dos planos de vibraciones con los que se va a trabajar se procede a realizar una tabla que permita relacionar la desalineación, las vibraciones y cada una de estas con el consumo energético, debido a que a nivel empresarial se pueden utilizar los equipos de alineación o de vibraciones para la detección de desalineación en un sistema.

Tabla 19-3: Valores de desalineación combinada, vibraciones y consumo energético del ACP

Desalineación paralela (mm)	Desalineación angular (mrad)	VTV rms en el LHG (mm/s)	VTV rms en el LAG (mm/s)	Potencia (kW)
0,00	0,00	0,696	0,398	2,985
0,10	0,86	0,687	0,429	2,989
0,21	1,71	0,763	0,457	2,992
0,30	2,57	0,759	0,468	2,996
0,40	3,51	0,747	0,425	3,000
0,50	4,29	1,131	0,451	3,007
0,60	5,14	1,254	0,481	3,012
0,70	6,00	1,551	0,538	3,018
0,80	6,94	1,371	0,497	3,025
0,90	7,71	1,252	0,507	3,030
1,00	8,57	1,153	0,525	3,035
1,10	9,43	1,715	0,536	3,038

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

A continuación, se realiza un estudio por separado de la desalineación versus el consumo energético y las vibraciones versus el consumo energético, por las razones antes mencionadas.

Para hallar los valores de la intercepción y de las 2 variables de desalineación, se aplica el procedimiento descrito en la sección 2.6. con lo que se obtienen los siguientes valores:

Tabla 20-3: Valores de coeficientes de regresión desalineación combinada, relación D vs P

Coefficiente de regresión	Valor
B ₀	2,9821
B ₁	0,0680
B ₂	-0,0019

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

Con los valores de la tabla 20-3 se substituyen en la ecuación 2, lo que muestra la ecuación característica:

$$P = 2,9821 + 0,068 D_p - 0,0019 D_A$$

Donde:

D_p = Desalineación paralela (mm)

D_A = Desalineación angular (mrad)

De la ecuación obtenida para la potencia se determina que en una situación en la que no existe el fenómeno de la desalineación el consumo energético tendría un valor de 2,9821 kW.

```
> cor.test(DPPC,DAPC)

Pearson's product-moment correlation

data: DPPC and DAPC
t = 226.9, df = 10, p-value < 2.2e-16
alternative hypothesis: true correlation is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 0.9996414 0.9999737
sample estimates:
      cor
0.9999029
```

Gráfico 23-3: Correlación variables independientes D_p vs D_A en el ACP

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

Con el valor de p-value = 2,2e-16 del gráfico 23-3 se tiene evidencia suficiente de una correlación entre las variables independientes de desalineación, por tal razón el modelo puede ser

representado por una de las mismas.

Para hallar los valores de la intercepción y de las 2 variables de vibraciones, se aplica el procedimiento descrito en la sección 2.6. con lo que se obtienen los siguientes valores:

Tabla 21-3: Valores de coeficientes de regresión desalineación combinada, relación V vs P

Coefficiente de regresión	Valor
B ₀	2,8801
B ₁	0,0195
B ₂	0,2296

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

Con los valores de la tabla 21-3 se substituyen en la ecuación 2, lo que muestra la ecuación característica:

$$P = 2,8801 + 0,0195 V_{LHG} + 0,2296 V_{LAG}$$

Donde:

V_{LHM} = Velocidad total de vibraciones del LHG (mm/s)

V_{LAG} = Velocidad total de vibraciones del LAG (mm/s)

De la ecuación obtenida para la potencia se determina que en una situación en la que no existe el fenómeno de vibraciones el consumo energético tendría un valor de 2,8801 kW.

```
> cor.test(VAPC, VHPC)
```

```
Pearson's product-moment correlation
```

```
data: VAPC and VHPC
t = 5.5044, df = 10, p-value = 0.0002602
alternative hypothesis: true correlation is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 0.5836115 0.9621858
sample estimates:
      cor
0.8670928
```

Gráfico 24-3: Correlación variables independientes V_{LHM} vs V_{LAG} en el ACP

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

Con el valor de p-value = 0,0002602 del gráfico 24-3 se tiene evidencia suficiente de una correlación entre las variables independientes de vibración, por tal razón el modelo puede ser representado por una de las mismas.

3.2. Analizar los resultados obtenidos de la regresión lineal múltiple

Para el análisis se realizará una comparación, asistida por el software RStudio, de los valores de las ecuaciones obtenidas en cada uno de los tipos de desalineamiento de los tres acoples, las líneas de comando para la comparación de la desalineación paralela, angular y combinada se las detalla respectivamente en ANEXO E, ANEXO F, ANEXO G.

3.2.1. Comparación de los resultados obtenidos de la desalineación paralela

El consumo energético medio registrado a causa de la desalineación paralela en el caso del acople tipo mandíbula es de 3 kW en relación del acople tipo dona de 3,005 kW, presentando un incremento de 5 watts, mientras que el consumo energético del acople con cubierta de poliuretano de 3,007 kW es mayor en referencia al acople tipo mandíbula en 7 watts como se muestra en el GRAFICO 25-3.

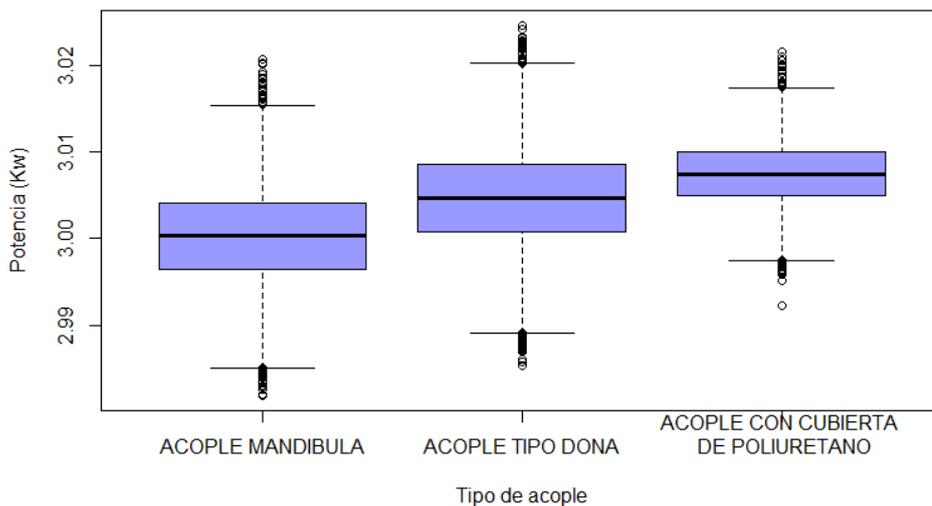


Gráfico 25-3: Consumo energético en función de la desalineación paralela

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

Para dicha comparación se utiliza el método t.test de la aplicación Rstudio, el cual compara una muestra a contrastar versus una muestra de control, cuyas significancias son presentadas en el ANEXO E.

3.2.2. Comparación de los resultados obtenidos de la desalineación angular

El consumo energético medio producto de la desalineación angular en el acople tipo mandíbula es de 2,982 kW, para el acople tipo dona de 3,022 kW, para el acople con cubierta de poliuretano de 3,010 kW, siendo el acople tipo dona el que presenta un mayor incremento de consumo de 40

watts en comparación al acople tipo mandíbula y 12 watts respecto al acople con cubierta de poliuretano, seguido del acople con cubierta de poliuretano con un incremento de consumo de 28 watts en referencia al acople tipo mandíbula como se muestra en el GRAFICO 26-3.

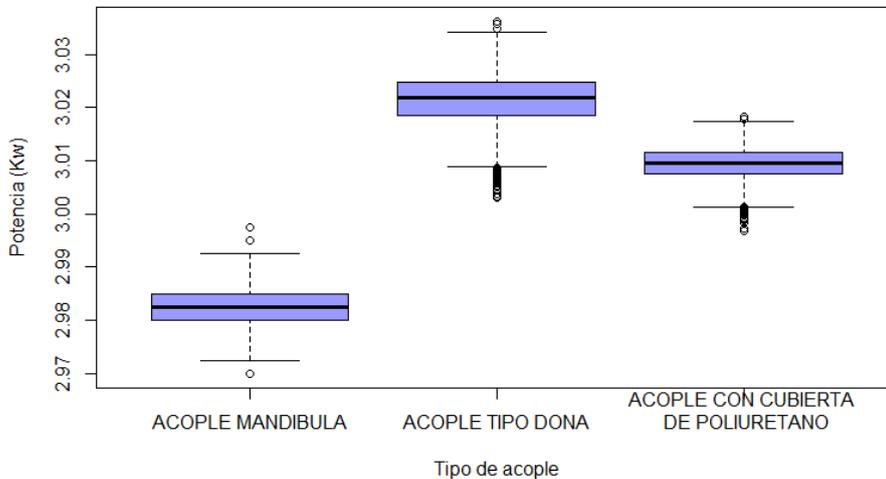


Gráfico 26-3: Consumo energético en función de la desalineación angular

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

Para dicha comparación se utiliza el método t.test de la aplicación Rstudio, el cual compara una muestra a contrastar versus una muestra de control, cuyas significancias son presentadas en el anexo F.

3.2.3. Comparación de los resultados obtenidos de la desalineación combinada

El consumo energético medio producto de la desalineación combinada en el acople tipo mandíbula es de 3,003 kW, para el acople tipo dona de 3,018 kW, para el acople con cubierta de poliuretano de 3,011 kW, siendo el acople tipo dona el que presenta un mayor incremento de consumo de 15 watts en comparación al acople tipo mandíbula y 7 watts respecto al acople con cubierta de poliuretano, seguido del acople con cubierta de poliuretano con un incremento de consumo de 8 watts en referencia al acople tipo mandíbula como se muestra en el GRAFICO 27-3.

Para dicha comparación se utiliza el método t.test de la aplicación Rstudio, el cual compara una muestra a contrastar versus una muestra de control, cuyas significancias son presentadas en el anexo G.

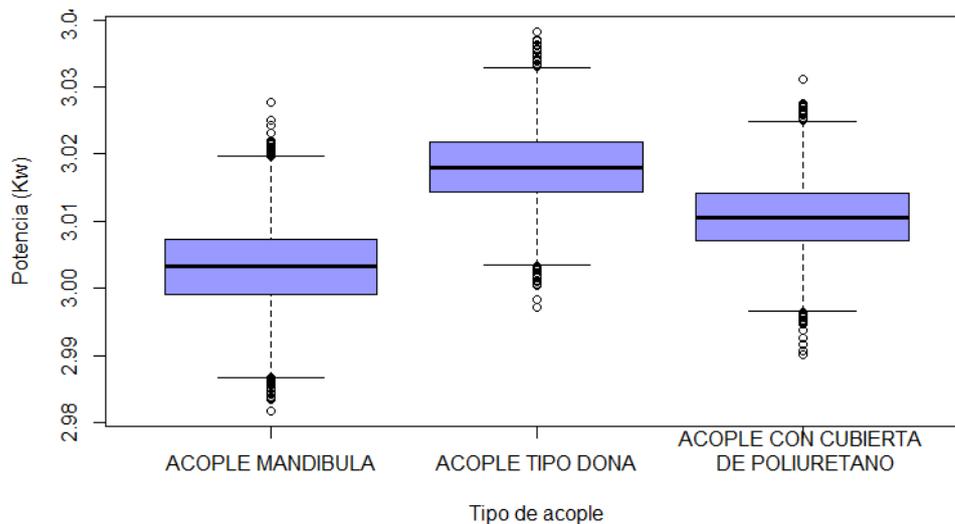


Gráfico 27-3: Consumo energético en función de la desalineación combinada

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

3.3. Comparación del costo de adquisición de los tres tipos de acoples

Para comparar el costo de los acoples se debe tomar en cuenta los costos directos e indirectos por lo cual se han generado las siguientes tablas que describen los costos de los diferentes acoples:

Tabla 22-3: Costo de adquisición Acople tipo mandíbula.

Ítem:	1			
Descripción:	Acople tipo mandíbula Marca LoveJoy Masas (mangones) tipo L.110 Elemento elástico tipo E			
Unidad:	u			
COSTOS DIRECTOS				
Material				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio (USD)	Total (USD)
Acople tipo mandíbula	u	1	110	110
Torneado de las masas	u	2	4	8
Transporte				
Descripción	Unidad	Cantidad	Tarifa/u (USD)	Total (USD)
Servicio de transporte		1	1,5	1,5
Costo directo total				119,5
COSTOS INDIRECTOS				
				10%
Precio unitario total				131,45

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

Tabla 23-3: Costo de adquisición Acople tipo dona.

Ítem:	2				
Descripción:	Acople tipo dona Marca LoveJoy Masas tipo S5 Polímero de neopreno tipo JN				
Unidad:	u				
COSTOS DIRECTOS					
Material					
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio (USD)	Total (USD)	
Acople tipo mandíbula	u	1	125	125	
Torneado de las masas	u	2	4	8	
Transporte					
Descripción	Unidad	Cantidad	Tarifa/u (USD)	Total (USD)	
Servicio de transporte		1	6	6	
Costo directo total				139	
COSTOS INDIRECTOS					
				10%	13,9
Precio unitario total				152,9	

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

Tabla 24-3: Costo de adquisición Acople con cubierta de poliuretano.

Ítem:	3				
Descripción:	Acople con cubierta de poliuretano Marca LoveJoy Serie Max Dinamic Tipo D-4				
Unidad:	u				
COSTOS DIRECTOS					
Material					
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio (USD)	Total (USD)	
Acople tipo mandíbula	u	1	135	135	
Torneado de las masas	u	2	4	8	
Transporte					
Descripción	Unidad	Cantidad	Tarifa/u (USD)	Total (USD)	
Servicio de transporte		1	6	6	
Costo directo total				149	
COSTOS INDIRECTOS					
				10%	14,9
Precio unitario total				163,9	

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

Con los datos de las tablas 22-3,23-3,24-3, se evidencia que el acople tipo mandíbula es el más económico llegando a costar 131,45 USD, el que le sigue es el acople tipo dona con un costo de 152,90 USD que es un 24,68% más costoso que el anterior y el más costoso es el acople con cubierta de poliuretano con un costo de 163,90 USD, que es un 32,16% más costoso que el primero.

3.4. Analizar los resultados obtenidos por termografía en los diferentes acoples

Al finalizar la medición número 12 con los diferentes tipos de desalineaciones se procede a realizar la termografía del equipo y registrar los valores correspondientes a los diferentes puntos de medición, los que se encuentran detallados en la **Sección 2.4.5**.

3.4.1. Acople tipo mandíbula

Los primero a realizarse con los valores obtenidos mediante la termografía es calcular las variaciones de temperatura entre la temperatura ambiente y la temperatura en los diferentes puntos de medición.

Con una desalineación paralela de 1,13 mm se obtienen los valores de temperatura de la tabla 22-3, detallados en el **ANEXO H**.

Con una desalineación angular de 10,20 mrad se obtienen los valores de temperatura de la tabla 23-3, detallados en el **ANEXO I**.

Tabla 25-3: Temperaturas obtenidas utilizando el AtM con desalineación paralela

Puntos de medición	Temperatura del elemento (°C)	Temperatura ambiente (°C)	ΔT_4 (°C)
T ₁	56	21	35
T ₂	61,6	21	40,6
T ₃	60	21	39
T ₄	42,6	21	21,6
T ₅	41,7	21	20,7
T ₆	42,2	21	21,2
T ₇	38,4	21	17,4
T ₈	52,2	21	31,2

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

Tabla 26-3: Temperaturas obtenidas utilizando el AtM con desalineación angular

Puntos de medición	Temperatura del elemento (°C)	Temperatura ambiente (°C)	ΔT_5 (°C)
T ₁	55,9	22	33,9
T ₂	63	22	41
T ₃	51,2	22	29,2
T ₄	38,9	22	16,9
T ₅	41,2	22	19,2
T ₆	46,9	22	24,9
T ₇	35,9	22	13,9
T ₈	43,9	22	21,9

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

Con una desalineación combinada en la que paralelamente se encuentra desplazado 1,12 mm y angularmente 9,60 mrad se obtienen los valores de temperatura detallados en el ANEXO J.

Tabla 27-3: Temperaturas obtenidas utilizando el AtM con desalineación combinada

Puntos de medición	Temperatura del elemento (°C)	Temperatura ambiente (°C)	ΔT_6 (°C)
T ₁	56,1	23	33,1
T ₂	68,8	23	45,8
T ₃	66,8	23	43,8
T ₄	49,3	23	26,3
T ₅	48,7	23	25,7
T ₆	52,3	23	29,3
T ₇	38,9	23	15,9
T ₈	54,7	23	31,7

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

Al tener la variación entre la temperatura del ambiente y la temperatura del elemento se procede a compilar los resultados, los que son:

Tabla 28-3: Temperaturas obtenidas utilizando el AtM con las diferentes desalineaciones

Puntos de medición	ΔT_1 (°C)	ΔT_4 (°C)	ΔT_5 (°C)	ΔT_6 (°C)
T ₁	34,5	35	33,9	33,1
T ₂	38,1	40,6	41	45,8
T ₃	27,7	39	29,2	43,8
T ₄	18,2	21,6	16,9	26,3
T ₅	21,6	20,7	19,2	25,7
T ₆	24,5	21,2	24,9	29,3
T ₇	13,4	17,4	13,9	15,9
T ₈	22	31,2	21,9	31,7

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

Por último, se debe realizar la variación de temperatura entre las temperaturas obtenidas con el equipo desalineado y las temperaturas obtenidas con el equipo alineado, además de añadir el diferencial de potencia obtenido, con lo que se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 29-3: Variación de temperatura: tipos de desalineación - equipo alineado con el AtM

Puntos de medición	Desalineación paralela		Desalineación angular		Desalineación combinada	
	ΔP (kW)	ΔT (°C)	ΔP (kW)	ΔT (°C)	ΔP (kW)	ΔT (°C)
T1	0,060	0,5	0,03	-0,6	0,063	-1,4
T2		2,5		2,9		7,7
T3		11,3		1,5		16,1
T4		3,4		-1,3		8,1
T5		-0,9		-2,4		4,1
T6		-3,3		0,4		4,8
T7		4		0,5		2,5
T8		9,2		-0,1		9,7

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

3.4.2. Acople tipo dona

Los primero a realizarse con los valores obtenidos mediante la termografía es calcular las variaciones de temperatura entre la temperatura ambiente y la temperatura en los diferentes puntos de medición.

Con una desalineación paralela de 1,10 mm se obtienen los valores de temperatura detallados en el ANEXO K.

Tabla 30-3: Temperaturas obtenidas utilizando el AtD con desalineación paralela

Puntos de medición	Temperatura del elemento (°C)	Temperatura ambiente (°C)	ΔT_7 (°C)
T ₁	51,3	22	29,3
T ₂	59,3	22	37,3
T ₃	49,6	22	27,6
T ₄	38,5	22	16,5
T ₅	41	22	19
T ₆	46	22	24
T ₇	34,3	22	12,3
T ₈	50,2	22	28,2

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

Con una desalineación angular de 9,51 mrad se obtienen los valores de temperatura detallados en el ANEXO L.

Tabla 31-3: Temperaturas obtenidas utilizando el AtD con desalineación angular

Puntos de medición	Temperatura del elemento (°C)	Temperatura ambiente (°C)	ΔT_8 (°C)
T ₁	53,1	22	31,1
T ₂	63,1	22	41,1
T ₃	51,1	22	29,1
T ₄	37,6	22	15,6
T ₅	39,8	22	17,8
T ₆	44,4	22	22,4
T ₇	33,4	22	11,4
T ₈	49,2	22	27,2

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

Con una desalineación combinada en la que paralelamente se encuentra desplazado 1,10 mm y angularmente 9,60 mrad se obtienen los valores de temperatura de la tabla 29-3, detallados en el ANEXO M.

Al tener la variación entre la temperatura del ambiente y la temperatura del elemento se procede a compilar los resultados en la tabla 30-3.

Tabla 32-3: Temperaturas obtenidas utilizando el AtD con desalineación combinada

Puntos de medición	Temperatura del elemento (°C)	Temperatura ambiente (°C)	ΔT_9 (°C)
T ₁	50,1	21	29,1
T ₂	61,9	21	40,9
T ₃	50,2	21	29,2
T ₄	40,2	21	19,2
T ₅	40,4	21	19,4
T ₆	42,8	21	21,8
T ₇	31,6	21	10,6
T ₈	53	21	32

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

Tabla 33-3: Temperaturas obtenidas utilizando el AtD con las diferentes desalineaciones

Puntos de medición	ΔT_2 (°C)	ΔT_7 (°C)	ΔT_8 (°C)	ΔT_9 (°C)
T ₁	30,1	29,3	31,1	29,1
T ₂	36,9	37,3	41,1	40,9
T ₃	25,9	27,6	29,1	29,2
T ₄	13,5	16,5	15,6	19,2
T ₅	17,7	19	17,8	19,4
T ₆	23,4	24	22,4	21,8
T ₇	13	12,3	11,4	10,6
T ₈	14,4	28,2	27,2	32

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

Por último, se debe realizar la variación de temperatura entre las temperaturas obtenidas con el equipo desalineado y las temperaturas obtenidas con el equipo alineado, además de añadir el diferencial de potencia, con lo que se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 34-3: Variación de temperatura: tipos de desalineación - equipo alineado con el AtD

Puntos de medición	Desalineación paralela		Desalineación angular		Desalineación combinada	
	ΔP (kW)	ΔT (°C)	ΔP (kW)	ΔT (°C)	ΔP (kW)	ΔT (°C)
T1	0,040	-0,8	0,056	1	0,065	-1
T2		0,4		4,2		4
T3		1,7		3,2		3,3
T4		3		2,1		5,7
T5		1,3		0,1		1,7
T6		0,6		-1		-1,6
T7		-0,7		-1,6		-2,4
T8		13,8		12,8		17,6

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

3.4.3. Acople con cubierta de poliuretano

Los primero a realizarse con los valores obtenidos mediante la termografía es calcular las variaciones de temperatura entre la temperatura ambiente y la temperatura en los diferentes puntos de medición.

Con una desalineación paralela de 1,10 mm se obtienen los valores de temperatura detallados en el ANEXO N.

Tabla 35-3: Temperaturas obtenidas utilizando el ACP con desalineación paralela

Puntos de medición	Temperatura del elemento (°C)	Temperatura ambiente (°C)	ΔT_{10} (°C)
T ₁	49,2	22	27,2
T ₂	50,5	22	28,5
T ₃	34,1	22	12,1
T ₄	37,8	22	15,8
T ₅	43,7	22	21,7
T ₆	33,3	22	11,3
T ₇	33,8	22	11,8

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

Con una desalineación angular de 9,51 mrad se obtienen los valores de temperatura detallados en el ANEXO O.

Tabla 36-3: Temperaturas obtenidas utilizando el ACP con desalineación angular

Puntos de medición	Temperatura del elemento (°C)	Temperatura ambiente (°C)	ΔT_{11} (°C)
T ₁	53	22	31
T ₂	52,5	22	30,5
T ₃	34,5	22	12,5
T ₄	37,4	22	15,4
T ₅	44,1	22	22,1
T ₆	33,3	22	11,3
T ₇	34,1	22	12,1

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

Con una desalineación combinada en la que paralelamente se encuentra desplazado 1,10 mm y angularmente 9,43 mrad se obtienen los valores de temperatura detallados en el ANEXO P.

Tabla 37-3: Temperaturas obtenidas utilizando el ACP con desalineación combinada

Puntos de medición	Temperatura del elemento (°C)	Temperatura ambiente (°C)	ΔT_{12} (°C)
T ₁	50,2	22,7	27,5
T ₂	51	22,7	28,3
T ₃	36,4	22,7	13,7
T ₄	40,2	22,7	17,5
T ₅	45,9	22,7	23,2
T ₆	35,2	22,7	12,5
T ₇	35,3	22,7	12,6

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

Al tener la variación entre la temperatura del ambiente y la temperatura del elemento se procede a compilar los resultados, los que son:

Tabla 38-3: Temperaturas obtenidas utilizando el ACP con las diferentes desalineaciones

Puntos de medición	ΔT_3 (°C)	ΔT_{10} (°C)	ΔT_{11} (°C)	ΔT_{12} (°C)
T ₁	27,6	27,2	31	27,5
T ₂	30,4	28,5	30,5	28,3
T ₃	13,2	12,1	12,5	13,7
T ₄	17,3	15,8	15,4	17,5
T ₅	22,9	21,7	22,1	23,2
T ₆	12,2	11,3	11,3	12,5
T ₇	11,5	11,8	12,1	12,6

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

Por último, se debe realizar la variación de temperatura entre las temperaturas obtenidas con el equipo desalineado y las temperaturas obtenidas con el equipo alineado, además de añadir el diferencial de potencia, con lo que se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 39-3: Variación de temperatura: tipos de desalineación - equipo alineado con el ACP

Puntos de medición	Desalineación paralela		Desalineación angular		Desalineación combinada	
	ΔP (kW)	ΔT (°C)	ΔP (kW)	ΔT (°C)	ΔP (kW)	ΔT (°C)
T1	0,046	-0,4	0,036	3,4	0,053	-0,1
T2		-1,9		0,1		-2,1
T3		-1,1		-0,7		0,5
T4		-1,5		-1,9		0,2
T5		-1,2		-0,8		0,3
T6		-0,9		-0,9		0,3
T7		0,3		0,6		1,1
T8		-0,4		3,4		-0,1

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

3.5. Comparación de los resultados obtenidos mediante termografía

3.5.1. Desalineación paralela

Con los valores de variación de temperatura y potencia en la desalineación paralela en los diferentes acoples, se han compilado en una sola tabla para comparar los resultados.

Tabla 40-3: Variación de temperatura para desalineación paralela

Punto de medición	AtM		AtD		ACP	
	ΔP (kW)	ΔT (°C)	ΔP (kW)	ΔT (°C)	ΔP (kW)	ΔT (°C)
Tapa del motor	0,06	0,5	0,04	-0,8	0,046	-0,4
Eje del motor		2,5		0,4		
Masa acople-motor		11,3		1,7		-1,9
Masa acople-generador		3,4		3		-1,1
Eje acople-generador		-0,9		1,3		-1,5
Eje del generador		-3,3		0,6		-1,2
Tapa del generador		4		-0,7		-0,9
Elemento elastomérico		9,2		13,8		0,3

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

Con los resultados expuestos en la tabla 24-3, la interpretación de los valores es la siguiente:

- El AtM presenta una mayor variación de potencia, mientras que el AtD y ACP poseen alrededor del 30% menos de variación de potencia
- El AtM posee un incremento mayor de temperatura en la tapa del motor lo que representa un mayor esfuerzo en el rodamiento del motor.
- El AtM presenta un incremento de temperatura en el eje del motor lo que representa en un sobrecalentamiento del rotor y la variación de velocidad de este.
- El AtM presenta un incremento de temperatura del 11,3°C lo que causa un dalo al elemento elastómerico.
- El AtM y AtD presentan un incremento de temperatura parecido en la masa del generador y una reducción de temperatura en el ACP, debido al esfuerzo causado por la desalineación paralela horizontal.
- En el AtM y ACP los esfuerzos son dirigidos al motor por lo cual la variación de temperatura en reducción, mientras que en el AtD el eje del generador recibe un esfuerzo que le incrementa la temperatura positivamente, esto genera una conducción térmica al generador como equipo.
- El AtM presenta un incremento de temperatura en la tapa del generador en la que se encuentra ubicado el rodamiento de éste, lo que indica un sobre esfuerzo en el rodamiento.
- El AtD y el AtM presenta un incremento de temperatura en el elemento elastomérico debido a la fricción entre las 2 masas, mientras que el ACP posee una superficie de contacto reducida con las masas por lo cual la conducción térmica es baja.

3.5.2. Desalineación angular

Con los valores de variación de temperatura y potencia en la desalineación angular en los diferentes acoples, se han compilado en una sola tabla para comparar los resultados.

Tabla 41-3: Variación de temperatura para desalineación angular

Punto de medición	AtM		AtD		ACP	
	ΔP (kW)	ΔT (°C)	ΔP (kW)	ΔT (°C)	ΔP (kW)	ΔT (°C)
Tapa del motor	0,03	-0,6	0,056	1	0,036	3,4
Eje del motor		2,9		4,2		
Masa acople-motor		1,5		3,2		0,1
Masa acople-generador		-1,3		2,1		-0,7
Eje acople-generador		-2,4		0,1		-1,9
Eje del generador		0,4		-1		-0,8
Tapa del generador		0,5		-1,6		-0,9
Elemento elastomérico		-0,1		12,8		0,6

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

Con los resultados expuestos en la tabla 25-3, la interpretación de los valores es la siguiente:

- El AtD presenta un incremento superior de potencia a los del ACP y AtM al estar sometido a una desalineación de tipo angular horizontal.
- El ACP presenta un incremento de temperatura en la tapa del motor lo que representa un sobreesfuerzo en el rodamiento
- En el AtD y AtM presentan un incremento de temperatura en el eje del motor lo cual representa un sobrecalentamiento del rotor y una reducción de la velocidad de giro.
- El AtD y AtM presenta un incremento de temperatura en la masa del acople lo confirma el sobrecalentamiento del rotor, mientras que el ACP su incremento de temperatura es minúsculo por lo cual el rotor no se encuentra sobrecalentado.
- El AtD presenta un incremento de temperatura en la masa del generador debido a la compresión generada en el elemento elastomérico.
- Los valores del Atm, AtD y ACP son inferiores a su valor al estar alineado por lo cual, en los puntos de eje del acople, eje del generador y tapa del generador se está representando que el esfuerzo en la desalineación angular radica en el motor.
- El AtD presenta un incremento de temperatura de 12,8°C en el elemento elastomérico debido a la compresión de este y a la temperatura de la masa del motor.

3.5.3. Desalineación combinada

Con los valores de variación de temperatura y potencia en la desalineación combinada en los diferentes acoples, se han compilado en una sola tabla para comparar los resultados.

Tabla 42-3: Variación de temperatura para desalineación combinada

Punto de medición	AtM		AtD		ACP	
	ΔP (kW)	ΔT (°C)	ΔP (kW)	ΔT (°C)	ΔP (kW)	ΔT (°C)
Tapa del motor	0,063	-1,4	0,065	-1	0,053	-0,1
Eje del motor		7,7		4		
Masa acople-motor		16,1		3,3		-2,1
Masa acople-generador		8,1		5,7		0,5
Eje acople-generador		4,1		1,7		0,2
Eje del generador		4,8		-1,6		0,3
Tapa del generador		2,5		-2,4		0,3
Elemento elastomérico		9,7		17,6		1,1

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

Con los resultados expuestos en la tabla 26-3, la interpretación de los valores es la siguiente:

- El AtD y AtM presentan un incremento de potencia superior por un 20% al ACP.
- Los valores obtenidos en la tapa del motor indican que no hay un sobreesfuerzo en el rodamiento del motor debido a la desalineación combinada.
- El AtM presenta un incremento de temperatura del 40% del AtD lo que representa un sobrecalentamiento del rotor del motor y una reducción de la velocidad del equipo.
- El AtM presenta un sobrecalentamiento en la masa del motor debido a la temperatura del eje del motor y a la compresión generada en el elemento elastomérico.
- La masa del acople del generador presenta un incremento de temperatura debido a la conducción térmica en el AtM y AtD y en el ACP se forma un espacio en el polímero que incrementa la temperatura de la masa del acople.
- El AtM presenta un incremento de temperatura en el eje del generador lo que representa una variación al voltaje generador por el generador.
- El AtM presenta un incremento de temperatura en la tapa del generador lo que representa un mayor esfuerzo en el rodamiento del generador.
- El AtD presenta un incremento de temperatura de 17,6°C debido a los esfuerzos de compresión y corte sometidos en el elemento elastomérico, en el AtM el incremento de temperatura de 9,7°C se debe a los esfuerzos de compresión y conducción térmica de las masas del acople. Con el ACP el incremento de temperatura de 1,1°C en debido a los esfuerzos de torsión y compresión.

3.6. Comparación del incremento del consumo energético vs desalineación

Según estudios un motor de 75 kW con una desalineación de 0,75 mm puede incrementar su consumo energético en 1,68%, llegando a representar hasta un 10% del mismo a nivel de la planta de producción pudiéndose reducir con actividades de alineación láser como se observa en el gráfico 28-3.

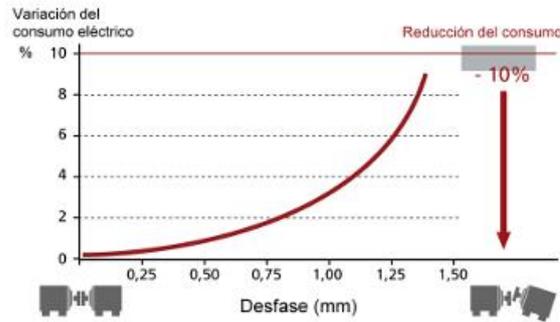


Gráfico 28-3: Consumo energético vs desalineación en motores eléctricos

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

Un motor eléctrico de 3,7 kW al trabajar al 80,38% de carga o 2,974 kW utilizando el acople tipo mandíbula en presencia de desalineación de 1,1 mm presenta un incremento en el consumo energético de 2,12% como se observa en el gráfico 29-3.

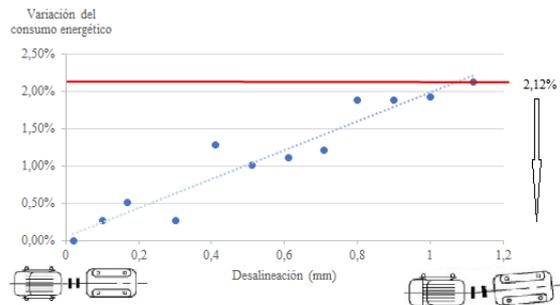


Gráfico 29-3: Consumo energético vs desalineación con el AtM

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

Un motor eléctrico de 3,7 kW al trabajar al 80,38% de carga o 2,974 kW utilizando el acople tipo dona en presencia de desalineación de 1,1 mm presenta un incremento en el consumo energético de 2,18% como se observa en el gráfico 30-3.

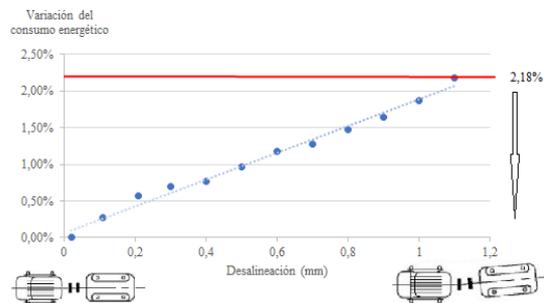


Gráfico 30-3: Consumo energético vs desalineación con el AtD

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

Un motor eléctrico de 3,7 kW al trabajar al 80,38% de carga o 2,974 kW utilizando el acople con cubierta de poliuretano en presencia de desalineación de 1,1 mm presenta un incremento en el consumo energético de 2,15% como se observa en el gráfico 31-3.

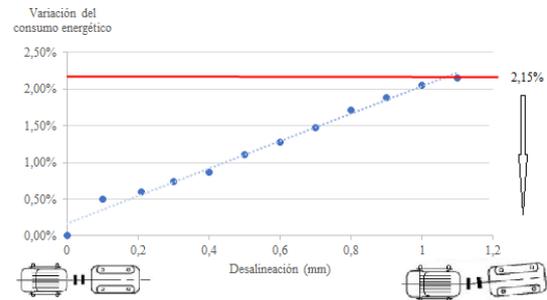


Gráfico 31-3: Consumo energético vs desalineación con el ACP

Realizado por: Granda, S. y Naula, J., 2022.

CONCLUSIONES

En conclusión, el acople tipo mandíbula presentó menor consumo energético tanto en desalineación paralela, desalineación angular y desalineación combinada, con valores de 3 kW, 2,982 kW y 3,003 kW respectivamente; el acople tipo dona presentó un menor consumo respecto al acople con cubierta de poliuretano en casos de desalineación angular y desalineación combinada, para el caso de desalineación paralela ocurrió lo opuesto entre dichos acoples, tal como se evidenció en los valores obtenidos.

Es claro que el acople tipo mandíbula es el más económico llegando a costar 131,45 USD, seguido del acople tipo dona con un costo de 152,90 USD que es un 24,69% más costoso que el anterior y el más costoso es el acople con cubierta de poliuretano con un costo de 163,90 USD, que es un 32,16% más costoso que el primero.

El producto de la desalineación paralela en un rango de 0,0 mm a 1,1 mm incidió en un incremento del valor de amplitud global de vibraciones rms mientras que el producto de la desalineación angular en un rango de 0,0 mrad a 9,5 mrad incidió en un incremento de la temperatura en los elementos de rodadura, elementos de unión y ejes.

RECOMENDACIONES

Al momento de poner en marcha el generador no se lo realice con carga, al momento de proceder a apagarlo tener en cuenta desconectar antes la carga.

Tener en cuenta la capacidad de carga nominal de los equipos y sus condiciones normales de funcionamiento.

Utilizar una carga de trabajo que no se vea afectada por las condiciones ambientales.

Se recomienda comprobar el ajuste de la tornillería que conforman el módulo de pruebas cada determinado número de ensayos dependiendo de la severidad de los mismos.

Realizar una investigación de la vida útil para el acople con cubierta de poliuretano y para el acople tipo dona.

Desarrollar una comparación utilizando un acople de tipo magnético, uno de tipo electromagnético y uno de tipo neumático.

BIBLIOGRAFÍA

ÁLVAREZ ÁLVAREZ, Nicolás. Alineación de equipos (Trabajo de titulación) (Maestría). [en línea] Universidad de Oviedo, Escuela Superior de la Marina Civil de Gijón, Oviedo-España. 2020. pp. 12-14. [Consulta: 2021-11-14] Disponible en: <http://hdl.handle.net/10651/57028>.

ARANGO LONDOÑO, Nicolás, & OBANDO LÓPEZ, Jorge. *Probabilidad y estadística* [en línea]. Fondo Editorial EIA, 2019. [Consulta: 10 de diciembre de 2021]. Disponible en: <https://elibro.net/es/ereader/epoch/125705>

BALDEÓN SILVA, Carlos Arturo. Diseño y construcción de un banco didáctico para pruebas de vibraciones y alineación láser en motores asincrónicos para el Laboratorio de Electricidad de la Facultad de Educación Técnica para el Desarrollo (Trabajo de titulación) (Ingeniería). [en línea] Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Educación Técnica para el Desarrollo, Ingeniería en Eléctrico Mecánica, Guayaquil-Ecuador. 2018. pp. 14-21. [Consulta: 2021-09-20]. Disponible en: <http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/11390/1/T-UCSG-PRE-TEC-IEM-159.pdf>

BESA GONZÁLVEZ, Antonio José, & CARBALLEIRA MORADO, Javier. *Diagnóstico y corrección de fallos de componentes mecánicos* [en línea]. Segunda edición. Valencia-España: Editorial de la Universidad Politécnica de Valencia, 2018. [Consulta: 10 de diciembre de 2021]. Disponible en: <https://elibro.net/es/ereader/epoch/57456>

CAÑADA SORIANO, Mar, & ROYO PASTOR, Rafael. *Termografía infrarroja: nivel II* [en línea]. Madrid-España: FC Editorial, 2016. [Consulta: 10 de diciembre de 2021]. Disponible en: <https://elibro.net/es/ereader/epoch/114218>

DÍAZ ZURITA, Miguel Ángel. Propuesta Estratégica para mejorar el Índice de Consumo Energético Eléctrico en la Procesadora de Arroz “Cristo Morado SAC (Trabajo de titulación) (Ingeniería). [en línea] Universidad PEDRO RUIZ GALLO, Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Mecánica y Eléctrica, Lambayeque - Perú. 2018. pp. 39-45. [Consulta: 2021-10-20]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12893/234>

FERNÁNDEZ, Alfonso. *Desalineación* [blog]. [Consulta: 14 de noviembre de 2022]. Disponible en: <https://power-mi.com/es/content/desalineaci%C3%B3n>

FERNÁNDEZ ROMERO, Luis Eduardo, & TOAPANTA GRANIZO, Jefferson Patricio. Implementación de un sistema automatizado de análisis vibracional para el mantenimiento predictivo en motores eléctricos (Trabajo de titulación) (Ingeniería). [en línea] Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Informática y Electrónica, Electrónica, Control y Redes Industriales, Riobamba – Ecuador. 2019. pp. 09-11. [Consulta: 2021-11-14]. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/13676>

FERNÁNDEZ, Richard. *ALINEAMIENTO DE MAQUINARIA INDUSTRIAL* [blog]. [Consulta: 14 de noviembre de 2022]. Disponible en: https://www.academia.edu/23683663/ALINEAMIENTO_DE_MAQUINARIA_INDUSTRIAL

FLORES IBARRA, José Enrique, & SILVA PINEDA, Fernando Vinicio. Modelo Empírico de influencia de la desalineación en el consumo energético en un motor eléctrico trifásico asincrónico jaula de ardilla de 5 HP (Trabajo de titulación) (Ingeniería). [en línea] Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Mecánica, Ingeniería de Mantenimiento, Riobamba – Ecuador. 2017. pp. 1-15. [Consulta: 2021-09-20]. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/9060>

FRENCH, A. P. *Vibraciones y ondas: curso de física MIT* [en línea]. Barcelona-España: Editorial Reverté, 2018. [Consulta: 10 de diciembre de 2021]. Disponible en: <https://elibro.net/es/ereader/esPOCH/105675>

GAVILÁNEZ PONCE, Homero Javier, & LLASAG GUALOTO, Henry Adrián. Método de valoración energética en función a la severidad de la desalineación, mediante el análisis vibracional y de la calidad de la energía (Trabajo de titulación) (Ingeniería). [en línea] Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Mecánica, Ingeniería de Mantenimiento, Riobamba – Ecuador. 2017. pp. 1-10. [Consulta: 2021-09-20]. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/6508>

ILBAY YUPA, Jeanneth Adriana, & PALOMEQUE VACA, Gabriela Fernanda. Estudio técnico para la implementación del uso eficiente de la energía en las piscinas de la ESPOCH (Trabajo de titulación) (Ingeniería). [en línea] Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Mecánica, Ingeniería Industrial, Riobamba – Ecuador. 2018. pp. 26-28. [Consulta: 2021-12-16]. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/9375>

ISLAS SALOMÓN, Celia; et al. *Probabilidad y estadística* [en línea]. México: Grupo Editorial Éxodo, 2018. [Consulta: 2021-11-10]. Disponible en: <https://elibro.net/es/lc/epoch/titulos/1285577-21>

ISO 50001:2018. *Sistemas de gestión de la energía.*

LAGLA TAIPE, Byron Rubén, & LANCHE PINEDA, Pablo Arturo. Desarrollo de estándares de tolerancia de desalineamiento de su consumo energético de motores eléctricos en el laboratorio de análisis vibracional de la Escuela de Ingeniería de Mantenimiento (Trabajo de titulación) (Ingeniería). [en línea] Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Mecánica, Ingeniería de Mantenimiento, Riobamba – Ecuador. 2016. pp. 1-2. [Consulta: 2021-09-20]. Disponible en: <http://dspace.esoch.edu.ec/handle/123456789/5179>

LÉMOLI, Martín. *¿Cómo afecta la desalineación en la confiabilidad de un motor eléctrico?* [blog]. [Consulta: 14 de noviembre de 2022]. Disponible en: <https://predictiva21.com/desalineacion-confiabilidad-motor-electrico/>

LOVEJOY. *S-Flex Endurance Coupling Product* [blog]. [Consulta: 12 de diciembre de 2022]. Disponible en: <https://www.lovejoy-inc.com/products/quick-flex-couplings/>

MAYDANA HUANCA, Alicia Roxana. Elección del mejor modelo entre regresión lineal múltiple y árboles de regresión para precindir del precio máximo de las acciones del Intel en función del precio de apertura y volumen de ventas de acciones por día - 2019 (Trabajo de titulación) (Ingeniería). [en línea] Universidad Nacional de Altiplano de Puno, Ingeniería Estadística e Informática, Escuela Profesional de Ingeniería Estadística e Informática, Puno – Perú. 2021. [Consulta: 2021-12-10]. Disponible en: http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/15333/Maydana_Huanca_Alicia_Roxana.pdf?sequence=1&isAllowed=y

MORALES CASTILLO, Felipe Simeón. Alineamiento entre acoples con equipo láser y su aplicación en el mantenimiento preventivo en la industria guatemalteca (Trabajo de titulación) (Ingeniería). [en línea] Universidad de San Carlo de Guatemala, Ingeniería, Ingeniería Mecánica. Guatemala. 2016. pp. 21-32. [Consulta: 2021-09-20]. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/45359171.pdf>

NÁJERA LUCIO, Cristian Geovany, & PILATAXI CHUQUI, José David. Análisis operacional de los sistemas mecánicos y eléctricos, mediante diagnóstico técnico para establecer el estado del funcionamiento del ascensor del edificio de laboratorios de la Facultad de Mecánica (Trabajo de titulación) (Ingeniería). [en línea] Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Mecánica, Ingeniería de Mantenimiento, Riobamba – Ecuador. 2017. pp. 11-26. [Consulta: 2021-12-10]. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/6478>

OLADE. “Situación del consumo energético a nivel mundial y para América Latina y el Caribe (ALC) y sus perspectivas”. *Sielac* [en línea], 2020, pp. 1-7. [Consulta: 15 de diciembre de 2021]. Disponible en: <http://sielac.olade.org/>

PÉREZ GONZÁLEZ, Antonio. *Mantenimiento mecánico de máquinas* [en línea]. Segunda edición. España: Universitat Jaume I. Servei de comunicació i Publicacions, 2003. [Consulta: 10 de diciembre de 2021]. Disponible en: <https://elibro.net/es/ereader/esPOCH/42317>

PRUFTECHNIK. UN DERROCHE DE ENERGÍA EQUIVALE A UN DERROCHE DE DINERO [en línea]. Alemania: 2017. [Consulta: 2021-09-20]. Disponible en: https://www.pruftechnik.com/fileadmin/Insights/Stories/Wasted-energy-means-wasted-dollars_ROTALIGN-touch_ALI/pdf/Whitepaper_Energy-Costs_A4_11-05-2017_es.pdf

TECNOLOGÍA PARA LA INDUSTRIA. *Ahorro energético en máquinas rotativas usando tecnologías de alineación* [blog]. 18 de mayo de 2018. [Consulta: 2021-09-20]. Disponible en: <https://tecnologiaparalaindustria.com/ahorro-energetico-en-maquinas-rotativas-usando-tecnologias-de-alineacion-2/>

RAMOS, Julio, et al. *Estadística básica para los negocios* [en línea]. Lima-Perú: Editorial de la Universidad de Lima, 2021. [Consulta: 10 de diciembre de 2021]. Disponible en: https://repositorio.ulima.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12724/10771/Ramos_Estad%C3%ADstica_b%C3%A1sica_de_los_negocios.pdf?sequence=1&isAllowed=y

RELIABILITYWEB. *El impacto de la alineación de precisión en el tiempo de vida.* [Consulta: 2021-11-14]. Disponible en: <https://reliabilityweb.com/sp/articles/entry/el-impacto-de-la-alineacion-de-precision-en-el-tiempo-de-vida>

SALGERO GAIBOR, Patricio Javier, & VILLEGAS SUÁREZ, Pablo Ricardo. Evaluación de los elementos rotativos mediante el análisis vibracional en el proceso de elaboración de tubos

PVC en la empresa HOLVIPLAS S.A. del cantón Ambato – provincia de Tungurahua (Trabajo de titulación) (Ingeniería). [en línea] Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Mecánica, Ingeniería de Mantenimiento. Riobamba – Ecuador. 2014. pp. 1-3. [Consulta: 2021-09-20]. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/3375>

ANEXOS

ANEXO A: TERMOGRAFÍA ACOPLÉ MANDÍBULA ALINEADO

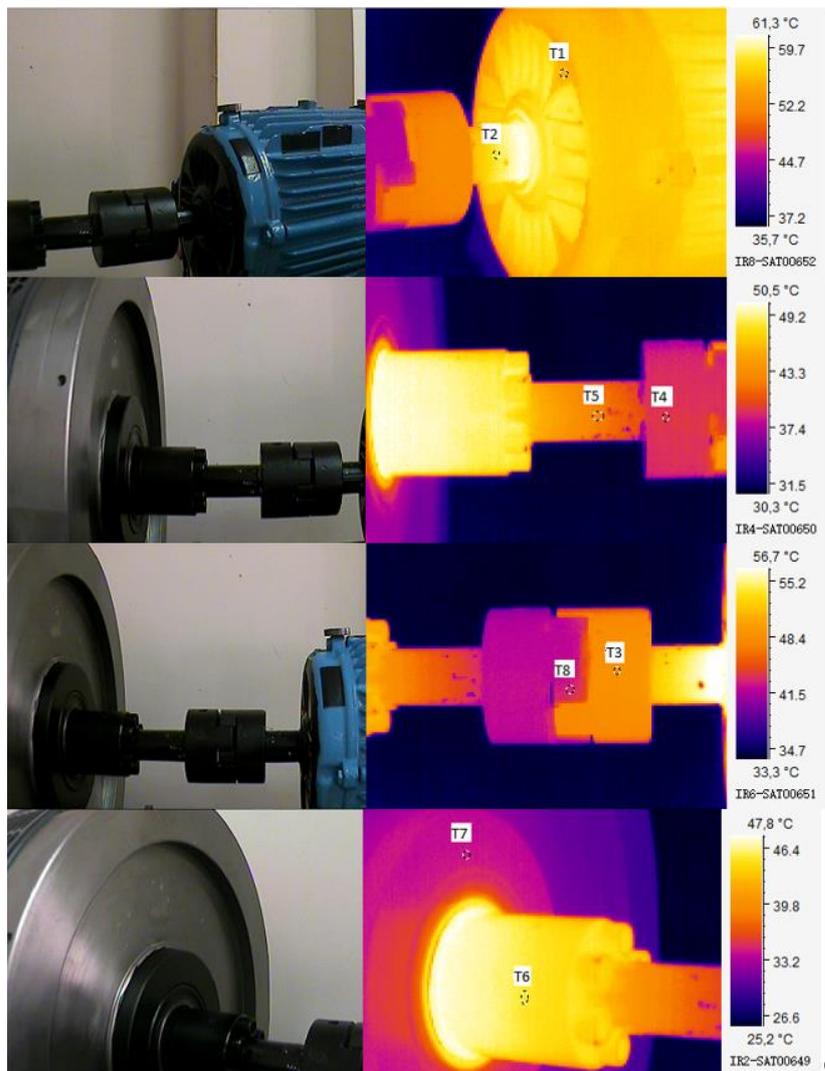


IMAGE INFO	VALUE
MIN TEMP	24,3°C
EMISSIVITY	0,95
MAX TEMP	61,2°C
AMBIENT TEMP	21,0°C
T1: AVG TEMP	55,5°C
T2: AVG TEMP	59,5°C
T3: AVG TEMP	48,7°C
T4: AVG TEMP	39,2°C
T5: AVG TEMP	42,6°C
T6: AVG TEMP	45,5°C
T7: AVG TEMP	34,4°C
T8: AVG TEMP	43°C

ANEXO B: TERMOGRAFÍA ACOUPLE TIPO DONA ALINEADO

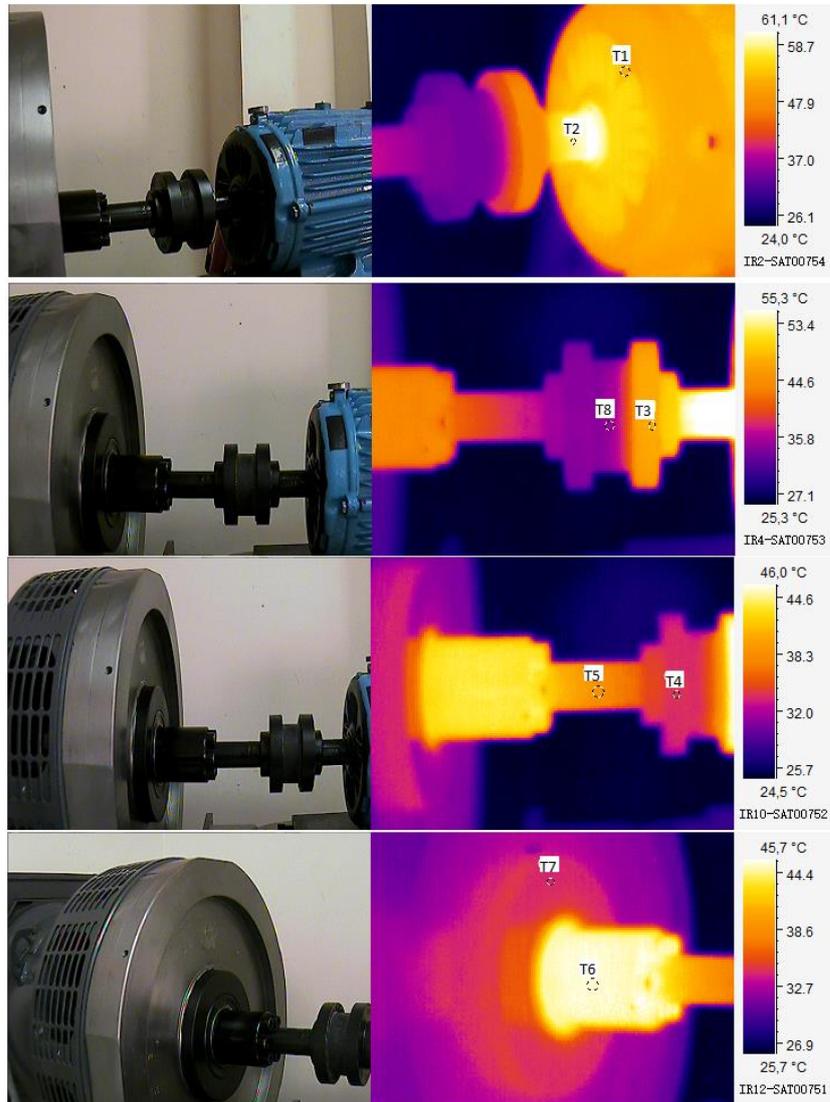


Image Info	Value
Min Temp	23,8°C
Emissivity	0,95
Max Temp	62,4°C
Ambient Temp	22,0°C
T1: Avg Temp	21,1°C
T2: Avg Temp	58,9°C
T3: Avg Temp	47,9°C
T4: Avg Temp	35,5°C
T5: Avg Temp	39,7°C
T6: Avg Temp	45,4°C
T7: Avg Temp	35°C
T8: Avg Temp	36,4°C

ANEXO C: TERMOGRAFÍA ACP ALINEADO

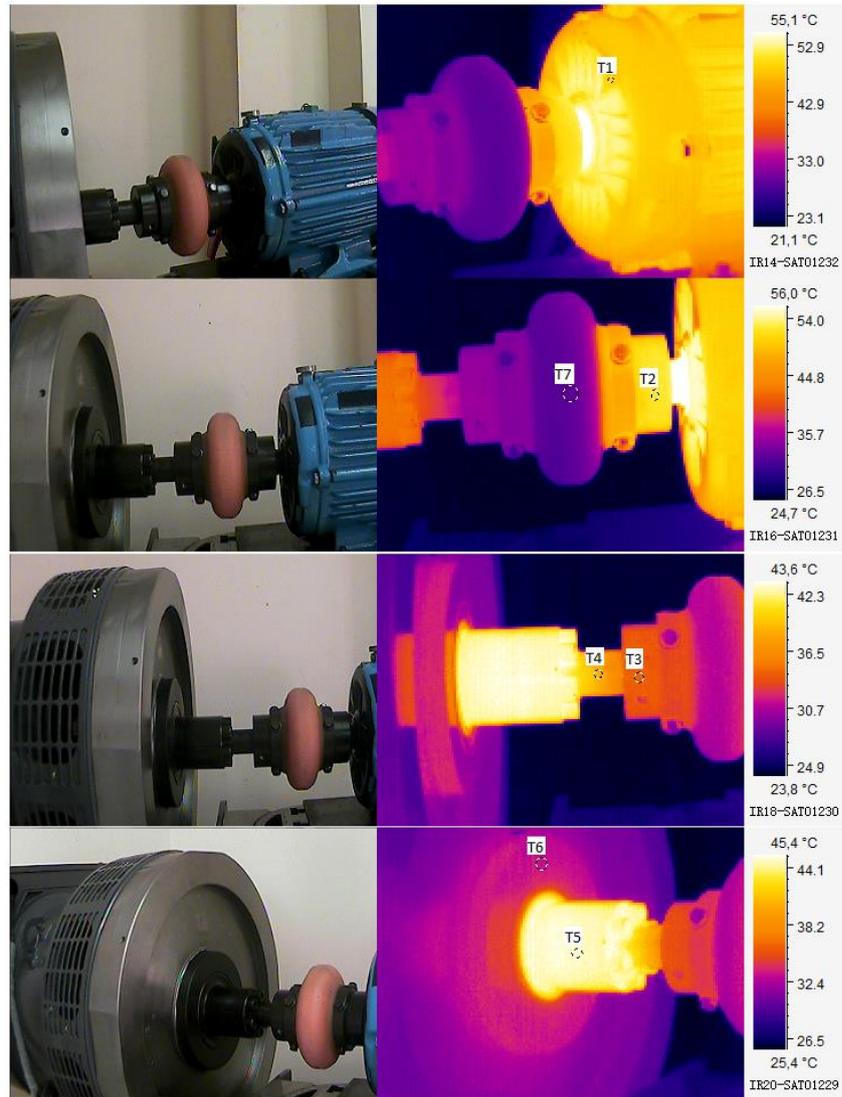


Image Info	Value
Min Temp	21,3°C
Emissivity	0,95
Max Temp	58,7°C
Ambient Temp	21,0°C
T1: Avg Temp	49,6°C
T2: Avg Temp	52,4°C
T3: Avg Temp	35,2°C
T4: Avg Temp	39,3°C
T5: Avg Temp	44,9°C
T6: Avg Temp	34,2°C
T7: Avg Temp	33,5°C

ANEXO D: CÓDIGO REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE

Desalineación paralela acople mandíbula

```
PARALELA<-read_xlsx("potparalelam.xlsx")
attach(PARALELA)
sapply(PARALELA, class)
REGRESION<- lm(POTPM~DPM+VPM,PARALELA)
summary(REGRESION)
pairs(PARALELA)
plot(REGRESION)
```

Desalineación paralela acople dona

```
PARALELA<-read_xlsx("potparalelad.xlsx")
attach(PARALELA)
sapply(PARALELA, class)
REGRESION<- lm(POTPD~DPM+VPM,PARALELA)
summary(REGRESION)
pairs(PARALELA)
plot(REGRESION)
```

Desalineación paralela acople con cubierta de poliuretano

```
PARALELA<-read_xlsx("potparalelap.xlsx")
attach(PARALELA)
sapply(PARALELA, class)
REGRESION<- lm(POTPP~DPM+VPM,PARALELA)
summary(REGRESION)
pairs(PARALELA)
plot(REGRESION)
```

Desalineación angular acople mandíbula

```
ANGULAR<-read_xlsx("potangularm.xlsx")
attach(ANGULAR)
sapply(ANGULAR, class)
REGRESION<- lm(POTAM~DAM+VAM,ANGULAR)
summary(REGRESION)
pairs(ANGULAR)
plot(REGRESION)
```

Desalineación angular acople dona

```
ANGULAR<-read_xlsx("potangulard.xlsx")
attach(ANGULAR)
sapply(ANGULAR, class)
REGRESION<- lm(POTAD~DAM+VAM,ANGULAR)
summary(REGRESION)
pairs(ANGULAR)
plot(REGRESION)
```

Desalineación angular acople con cubierta de poliuretano

```
ANGULAR<-read_xlsx("potangularp.xlsx")
attach(ANGULAR)
sapply(ANGULAR, class)
```

```
REGRESION<- lm(POTAP~DAM+VAM,ANGULAR)
summary(REGRESION)
pairs(ANGULAR)
plot(REGRESION)
```

Desalineación combinada acople mandíbula

```
COMBINADA<-read_xlsx("potcombinadam.xlsx")
attach(COMBINADA)
sapply(COMBINADA, class)
REGRESION<- lm(POTCM~DPM+DAM+VPM+VAM,COMBINADA)
summary(REGRESION)
pairs(COMBINADA)
plot(REGRESION)
```

Desalineación combinada acople dona

```
COMBINADA<-read_xlsx("potcombinadad.xlsx")
attach(COMBINADA)
sapply(COMBINADA, class)
REGRESION<- lm(POTCD~ DPM+DAM+VPM+VAM,COMBINADA)
summary(REGRESION)
pairs(COMBINADA)
plot(REGRESION)
```

Desalineación combinada acople con cubierta de poliuretano

```
COMBINADA<-read_xlsx("potcombinadap.xlsx")
attach(COMBINADA)
sapply(COMBINADA, class)
REGRESION<- lm(POTCP~ DPM+DAM+VPM+VAM,COMBINADA)
summary(REGRESION)
pairs(COMBINADA)
plot(REGRESION)
```

ANEXO E: CÓDIGO CONSUMO ENERGÉTICO - DESALINEACIÓN PARALELA

```
PARALELA<-read_xlsx("paralela.xlsx")
attach(PARALELA)
curvaM=c(POTPM)
curvaD=(POTPD)
curvaP=(POTPP)
cor.test(POTPM,DPM)
cor.test(POTPM,VPM)
cor.test(POTPD,DPD)
cor.test(POTPD,VPD)
cor.test(POTPP,DPP)
cor.test(POTPP,VPP)
hist(curvaM)
hist(curvaD)
hist(curvaP)
library(nortest)
lillie.test(curvaM)
bootstrapM = replicate(n=10000,sample(curvaM,replace = T))
mediasM = apply(bootstrapM,MARGIN = 2,FUN = mean)
lillie.test(mediasM)
mean(curvaM)
mean(mediasM)
lillie.test(curvaD)
bootstrapD = replicate(n=10000,sample(curvaD,replace = T))
mediasD = apply(bootstrapD,MARGIN = 2,FUN = mean)
lillie.test(mediasD)
mean(curvaD)
mean(mediasD)
lillie.test(curvaP)
bootstrapP = replicate(n=10000,sample(curvaP,replace = T))
mediasP = apply(bootstrapP,MARGIN = 2,FUN = mean)
lillie.test(mediasP)
mean(curvaP)
mean(mediasP)
summary(mediasM)
summary(mediasD)
summary(mediasP)
par(mfrow = c(1, 3), mar = c(4.5, 3.5, 1, 1))
hist(mediasM,main="",ylab="",freq = F)
curve(dnorm(x,mean(mediasM),sd(mediasM)),add=T)
hist(mediasD,main="",ylab="",freq = F)
curve(dnorm(x,mean(mediasD),sd(mediasD)),add=T)
hist(mediasP,main="",ylab="",freq = F)
curve(dnorm(x,mean(mediasP),sd(mediasP)),add=T)
boxplot(mediasM,mediasD,mediasP,col=rgb(0, 0, 1, alpha = 0.4),
        xlab = "Tipo de acople",ylab = "Potencia (KW)",
        main="COMPARACIÓN DE CONSUMO ENERGÉTICO - DESALINEACIÓN
PARALELA",
        at=c(1,2,3),names = c("ACOPLE MANDIBULA","ACOPLE TIPO DONA","ACOPLE
CON CUBIERTA \n DE POLIURETANO"))
```

#H0: Las pérdidas de energía en el ACOPLÉ TIPO DONA son mayores que en el ACOPLÉ MANDIBULA

```
t.test(mediasD,mediasM,paired = T,alternative = "greater")
```

Paired t-test

```
data: mediasD and mediasM
```

```
t = 53.972, df = 9999, p-value < 2.2e-16
```

```
alternative hypothesis: true difference in means is greater than 0
```

```
95 percent confidence interval:
```

```
0.00416633      Inf
```

```
sample estimates:
```

```
mean of the differences
```

```
0.004297307
```

#Como p valor $< 2.2e-16 < 0.05$; se acepta la hipótesis nula y se concluye que

#Existe suficiente evidencia que respaldan la aseveración que el consumo energético

#del ACOPLÉ TIPO DONA es mayor que el ACOPLÉ MANDIBULA

#H0: Las pérdidas de energía en el ACOPLÉ CON CUBIERTA DE POLIURETANO son mayores que en el ACOPLÉ MANDIBULA

```
t.test(mediasP,mediasM,paired = T,alternative = "greater")
```

Paired t-test

```
data: mediasP and mediasM
```

```
t = 106.67, df = 9999, p-value < 2.2e-16
```

```
alternative hypothesis: true difference in means is greater than 0
```

```
95 percent confidence interval:
```

```
0.006922053      Inf
```

```
sample estimates:
```

```
mean of the differences
```

```
0.007030469
```

#Como p valor $< 2.2e-16 < 0.05$; se acepta la hipótesis nula y se concluye que

#Existe suficiente evidencia que respaldan la aseveración que el consumo energético

#del ACOPLÉ CON CUBIERTA DE POLIURETANO es mayor que el ACOPLÉ

MANDIBULA

#H0: Las pérdidas de energía en el ACOPLÉ CON CUBIERTA DE POLIURETANO son mayores que en el ACOPLÉ TIPO DONA

```
t.test(mediasP,mediasD,paired = T,alternative = "greater")
```

Paired t-test

```
data: mediasP and mediasD
```

```
t = 39.972, df = 9999, p-value < 2.2e-16
```

```
alternative hypothesis: true difference in means is greater than 0
```

```
95 percent confidence interval:
```

```
0.002620683      Inf
```

```
sample estimates:
```

```
mean of the differences
```

```
0.002733162
```

#Como p valor $< 2.2e-16 < 0.05$; se acepta la hipótesis nula y se concluye que

#Existe suficiente evidencia que respaldan la aseveración que el consumo energético

#del ACOPLÉ CON CUBIERTA DE POLIURETANO es mayor que el ACOPLÉ TIPO DONA

ANEXO F: CÓDIGO CONSUMO ENERGÉTICO - DESALINEACIÓN ANGULAR

```
ANGULAR<-read_xlsx("angular.xlsx")
attach(ANGULAR)
curvaM=c(POTAM)
curvaD=(POTAD)
curvaP=(POTAP)
cor.test(POTAM,DAM)
cor.test(POTAM,VAM)
cor.test(POTAD,DAD)
cor.test(POTAD,VAD)
cor.test(POTAP,DAP)
cor.test(POTAP,VAP)
hist(curvaM)
hist(curvaD)
hist(curvaP)
library(nortest)
lillie.test(curvaM)
bootstrapM = replicate(n=10000,sample(curvaM,replace = T))
mediasM = apply(bootstrapM,MARGIN = 2,FUN = mean)
lillie.test(mediasM)
mean(curvaM)
mean(mediasM)
lillie.test(curvaD)
bootstrapD = replicate(n=10000,sample(curvaD,replace = T))
mediasD = apply(bootstrapD,MARGIN = 2,FUN = mean)
lillie.test(mediasD)
mean(curvaD)
mean(mediasD)
lillie.test(curvaP)
bootstrapP = replicate(n=10000,sample(curvaP,replace = T))
mediasP = apply(bootstrapP,MARGIN = 2,FUN = mean)
lillie.test(mediasP)
mean(curvaP)
mean(mediasP)
summary(mediasM)
summary(mediasD)
summary(mediasP)
par(mfrow = c(1, 3), mar = c(4.5, 3.5, 1, 1))
hist(mediasM,main="",ylab="",freq = F)
curve(dnorm(x,mean(mediasM),sd(mediasM)),add=T)
hist(mediasD,main="",ylab="",freq = F)
curve(dnorm(x,mean(mediasD),sd(mediasD)),add=T)
hist(mediasP,main="",ylab="",freq = F)
curve(dnorm(x,mean(mediasP),sd(mediasP)),add=T)
boxplot(mediasM,mediasD,mediasP,col=rgb(0, 0, 1, alpha = 0.4),
        xlab = "Tipo de acople",ylab = "Potencia (KW)",
        main="COMPARACIÓN DE CONSUMO ENERGÉTICO - DESALINEACIÓN
ANGULAR",
        at=c(1,2,3),names = c("ACOPLE MANDIBULA","ACOPLE TIPO DONA","ACOPLE
CON CUBIERTA \n DE POLIURETANO"))
```

#H0: Las pérdidas de energía en el ACOPLÉ TIPO DONA son mayores que en el ACOPLÉ MANDIBULA

```
t.test(mediasD,mediasM,paired = T,alternative = "greater")
```

Paired t-test

```
data: mediasD and mediasM
```

```
t = 610.36, df = 9999, p-value < 2.2e-16
```

```
alternative hypothesis: true difference in means is greater than 0
```

```
95 percent confidence interval:
```

```
0.03896183      Inf
```

```
sample estimates:
```

```
mean of the differences
```

```
0.03906712
```

#Como p valor $< 2.2e-16 < 0.05$; se acepta la hipótesis nula y se concluye que

#Existe suficiente evidencia que respaldan la aseveración que el consumo energético

#del ACOPLÉ TIPO DONA es mayor que el ACOPLÉ MANDIBULA

#H0: Las pérdidas de energía en el ACOPLÉ CON CUBIERTA DE POLIURETANO son mayores que en el ACOPLÉ MANDIBULA

```
t.test(mediasP,mediasM,paired = T,alternative = "greater")
```

Paired t-test

```
data: mediasP and mediasM
```

```
t = 524.57, df = 9999, p-value < 2.2e-16
```

```
alternative hypothesis: true difference in means is greater than 0
```

```
95 percent confidence interval:
```

```
0.02689776      Inf
```

```
sample estimates:
```

```
mean of the differences
```

```
0.02698237
```

#Como p valor $< 2.2e-16 < 0.05$; se acepta la hipótesis nula y se concluye que

#Existe suficiente evidencia que respaldan la aseveración que el consumo energético

#del ACOPLÉ CON CUBIERTA DE POLIURETANO es mayor que el ACOPLÉ MANDIBULA

#H0: Las pérdidas de energía en el ACOPLÉ CON CUBIERTA DE POLIURETANO son mayores que en el ACOPLÉ TIPO DONA

```
t.test(mediasP,mediasD,paired = T,alternative = "less")
```

Paired t-test

```
data: mediasP and mediasD
```

```
t = -216.37, df = 9999, p-value < 2.2e-16
```

```
alternative hypothesis: true difference in means is less than 0
```

```
95 percent confidence interval:
```

```
-Inf -0.01199287
```

```
sample estimates:
```

```
mean of the differences
```

```
-0.01208475
```

#Como p valor $< 2.2e-16 < 0.05$; se rechaza la hipótesis nula y se concluye que

#Existe suficiente evidencia que respaldan la aseveración que el consumo energético

#del ACOPLÉ CON CUBIERTA DE POLIURETANO es menor que el ACOPLÉ TIPO DONA

ANEXO G: CÓDIGO CONSUMO ENERGÉTICO - DESALINEACIÓN COMBINADA

```
COMBINADA<-read_xlsx("combinada.xlsx")
attach(COMBINADA)
curvaM=(POTCM)
curvaD=(POTCD)
curvaP=(POTCP)
cor.test(POTCM,DPMC)
cor.test(POTCM,DAMC)
cor.test(POTCM,VHMC)
cor.test(POTCM,VAMC)
cor.test(POTCD,DPDC)
cor.test(POTCD,DADC)
cor.test(POTCD,VHDC)
cor.test(POTCD,VADC)
cor.test(POTCP,DPPC)
cor.test(POTCP,DAPC)
cor.test(POTCP,VHPC)
cor.test(POTCP,VAPC)
hist(curvaM)
hist(curvaD)
hist(curvaP)
library(nortest)
lillie.test(curvaM)
bootstrapM = replicate(n=10000,sample(curvaM,replace = T))
mediasM = apply(bootstrapM,MARGIN = 2,FUN = mean)
lillie.test(mediasM)
mean(curvaM)
mean(mediasM)
lillie.test(curvaD)
bootstrapD = replicate(n=10000,sample(curvaD,replace = T))
mediasD = apply(bootstrapD,MARGIN = 2,FUN = mean)
lillie.test(mediasD)
mean(curvaD)
mean(mediasD)
lillie.test(curvaP)
bootstrapP = replicate(n=10000,sample(curvaP,replace = T))
mediasP = apply(bootstrapP,MARGIN = 2,FUN = mean)
lillie.test(mediasP)
mean(curvaP)
mean(mediasP)
summary(mediasM)
summary(mediasD)
summary(mediasP)
par(mfrow = c(1, 3), mar = c(4.5, 3.5, 1, 1))
hist(mediasM,main="",ylab="",freq = F)
curve(dnorm(x,mean(mediasM),sd(mediasM)),add=T)
hist(mediasD,main="",ylab="",freq = F)
curve(dnorm(x,mean(mediasD),sd(mediasD)),add=T)
hist(mediasP,main="",ylab="",freq = F)
curve(dnorm(x,mean(mediasP),sd(mediasP)),add=T)
boxplot(mediasM,mediasD,mediasP,col=rgb(0, 0, 1, alpha = 0.4),
```

```

xlab = "Tipo de acople",ylab = "Potencia (KW)",
main="COMPARACIÓN DE CONSUMO ENERGÉTICO - DESALINEACIÓN
COMBINADA",
at=c(1,2,3),names = c("ACOPLE MANDIBULA","ACOPLE TIPO DONA","ACOPLE
CON CUBIERTA \n DE POLIURETANO"))
#H0: Las pérdidas de energía en el ACOUPLE TIPO DONA son mayores que en el ACOUPLE
MANDIBULA
t.test(mediasD,mediasM,paired = T,alternative = "greater")
Paired t-test

```

```

data: mediasD and mediasM
t = 184.74, df = 9999, p-value < 2.2e-16
alternative hypothesis: true difference in means is greater than 0
95 percent confidence interval:
 0.01482572      Inf
sample estimates:
mean of the differences
 0.01495892

```

```

#Como p valor <2.2e-16 < 0.05; se acepta la hipótesis nula y se concluye que
#Existe suficiente evidencia que respaldan la aseveración que el consumo energético
#del ACOUPLE TIPO DONA es mayor que el ACOUPLE MANDIBULA
#H0: Las pérdidas de energía en el ACOUPLE CON CUBIERTA DE POLIURETANO son
mayores que en el ACOUPLE MANDIBULA
t.test(mediasP,mediasM,paired = T,alternative = "greater")

```

Paired t-test

```

data: mediasP and mediasM
t = 93.158, df = 9999, p-value < 2.2e-16
alternative hypothesis: true difference in means is greater than 0
95 percent confidence interval:
 0.007275165      Inf
sample estimates:
mean of the differences
 0.00740594

```

```

#Como p valor <2.2e-16 < 0.05; se acepta la hipótesis nula y se concluye que
#Existe suficiente evidencia que respaldan la aseveración que el consumo energético
#del ACOUPLE CON CUBIERTA DE POLIURETANO es mayor que el ACOUPLE
MANDIBULA
#H0: Las pérdidas de energía en el ACOUPLE CON CUBIERTA DE POLIURETANO son
mayores que en el ACOUPLE TIPO DONA
t.test(mediasP,mediasD,paired = T,alternative = "less")

```

Paired t-test

```

data: mediasP and mediasD
t = -101.39, df = 9999, p-value < 2.2e-16
alternative hypothesis: true difference in means is less than 0
95 percent confidence interval:
 -Inf -0.007430439
sample estimates:
mean of the differences
 -0.00755298

```

```

#Como p valor <2.2e-16 < 0.05; se rechaza la hipótesis nula y se concluye que
#Existe suficiente evidencia que respaldan la aseveración que el consumo energético
#del ACOUPLE CON CUBIERTA DE POLIURETANO es menor que el ACOUPLE TIPO DONA

```

ANEXO H: TERMOGRAFÍA AtM DESALINEACIÓN PARALELA

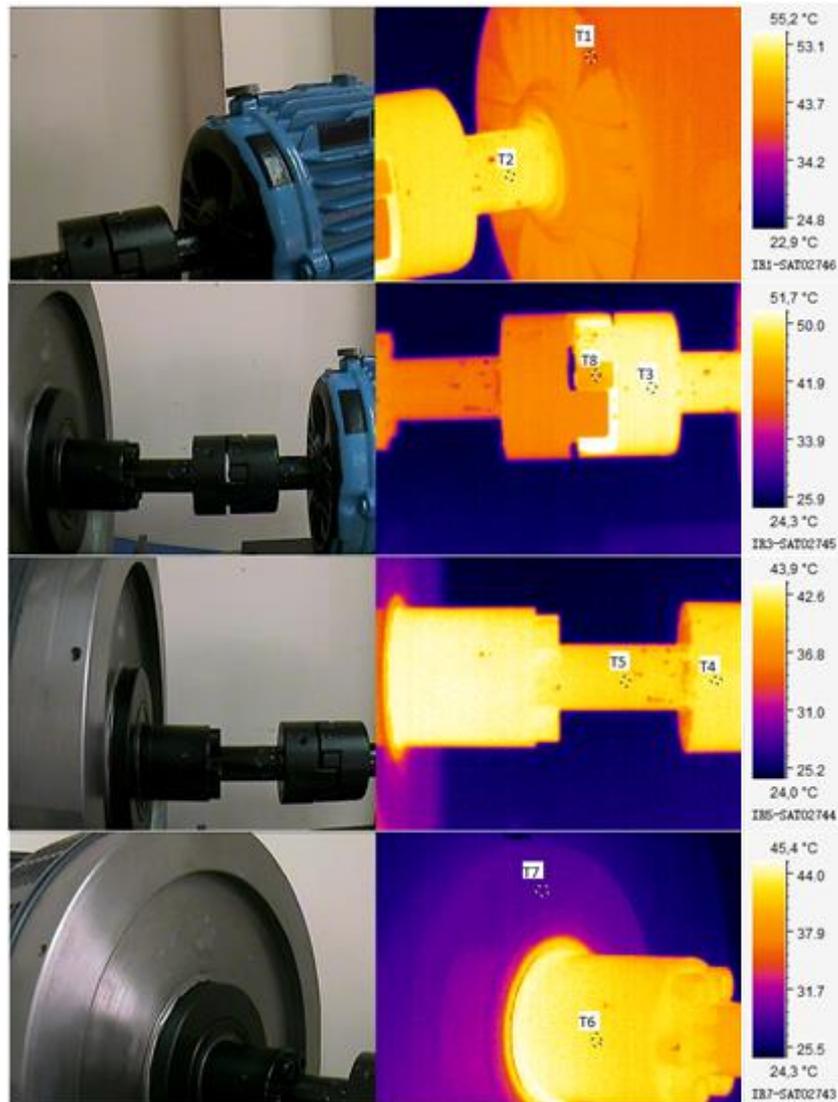


Image Info	Value
Min Temp	22,8°C
Emissivity	0,95
Max Temp	62,1°C
Ambient Temp	22,0°C
T1: Avg Temp	56°C
T2: Avg Temp	61,6°C
T3: Avg Temp	60°C
T4: Avg Temp	42,6°C
T5: Avg Temp	41,7°C
T6: Avg Temp	42,2°C
T7: Avg Temp	38,4°C
T8: Avg Temp	52,2°C

ANEXO I: TERMOGRAFÍA A±M DESALINEACIÓN ANGULAR

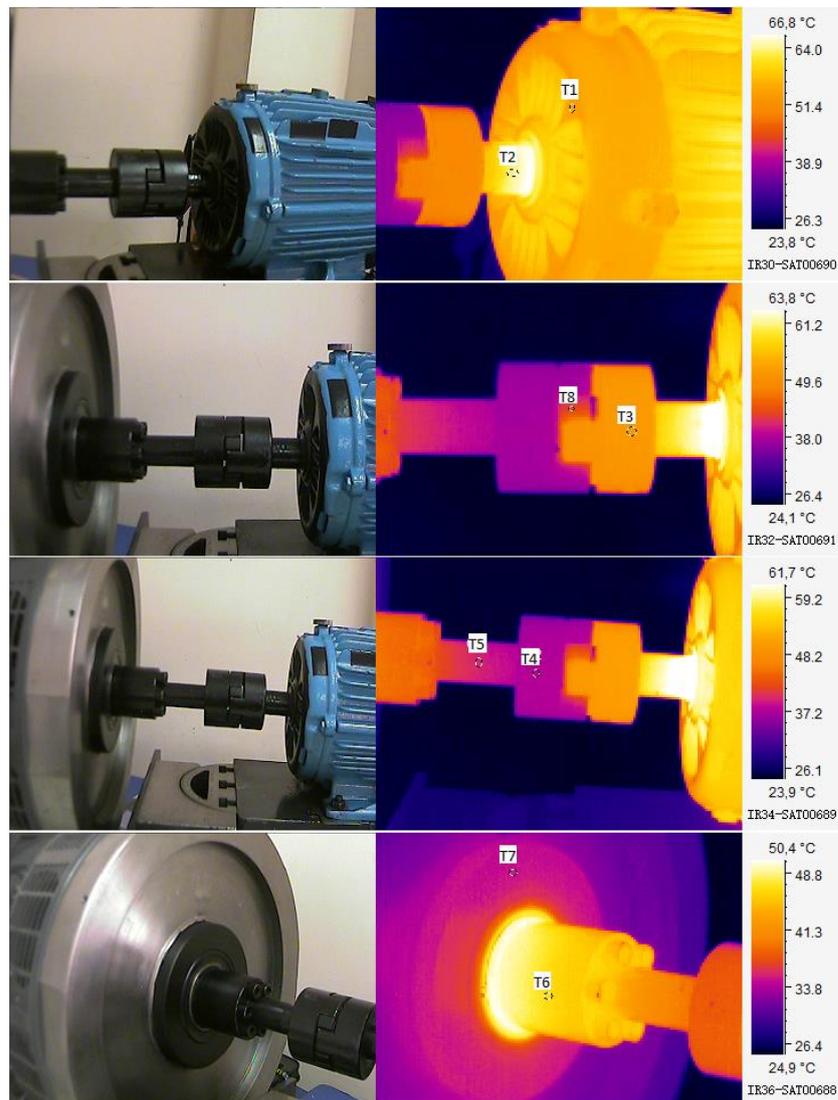


Image Info	Value
Min Temp	23,7°C
Emissivity	0,95
Max Temp	66,8°C
Ambient Temp	22,0°C
T1: Avg Temp	55,9°C
T2: Avg Temp	63°C
T3: Avg Temp	51,2°C
T4: Avg Temp	38,9°C
T5: Avg Temp	41,2°C
T6: Avg Temp	46,9°C
T7: Avg Temp	35,9°C
T8: Avg Temp	43,9°C

ANEXO J: TERMOGRAFÍA AtM DESALINEACIÓN COMBINADA

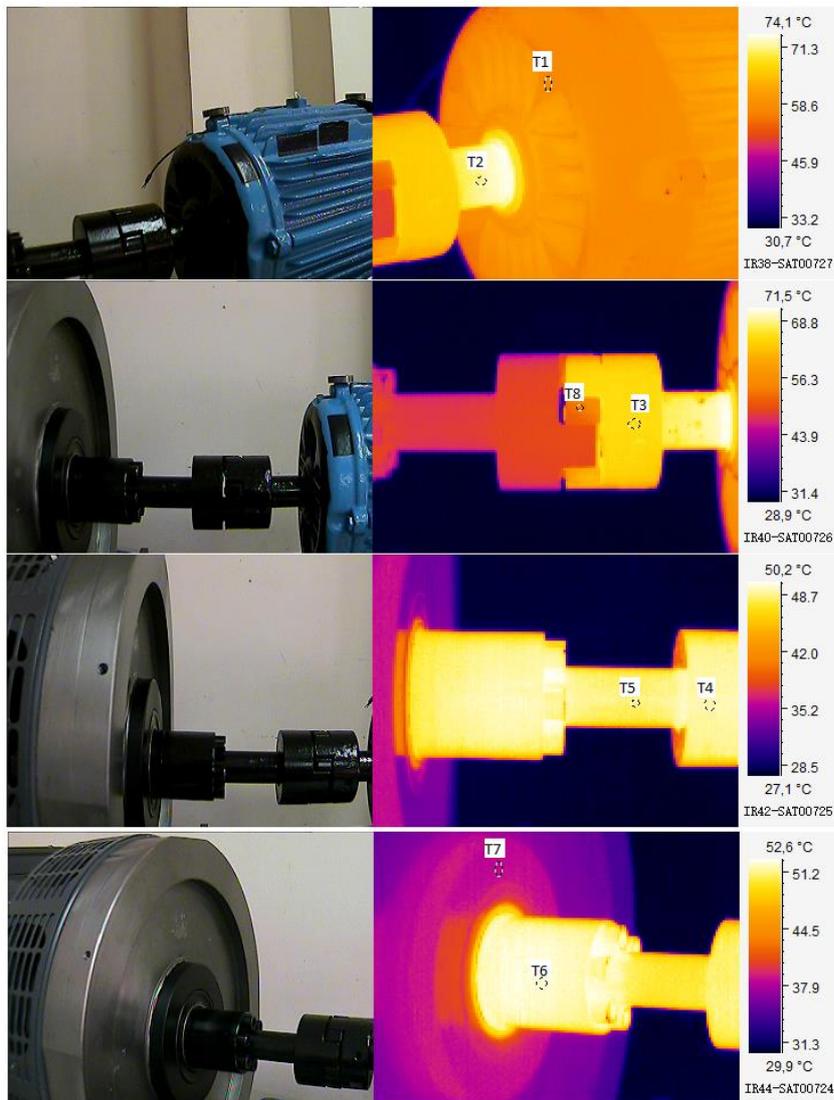


Image Info	Value
Min Temp	27°C
Emissivity	0,95
Max Temp	74,5°C
Ambient Temp	22,0°C
T1: Avg Temp	56,1°C
T2: Avg Temp	68,8°C
T3: Avg Temp	66,8°C
T4: Avg Temp	49,3°C
T5: Avg Temp	48,7°C
T6: Avg Temp	52,3°C
T7: Avg Temp	38,9°C
T8: Avg Temp	54,7°C

ANEXO K: TERMOGRAFÍA AtD DESALINEACIÓN PARALELA

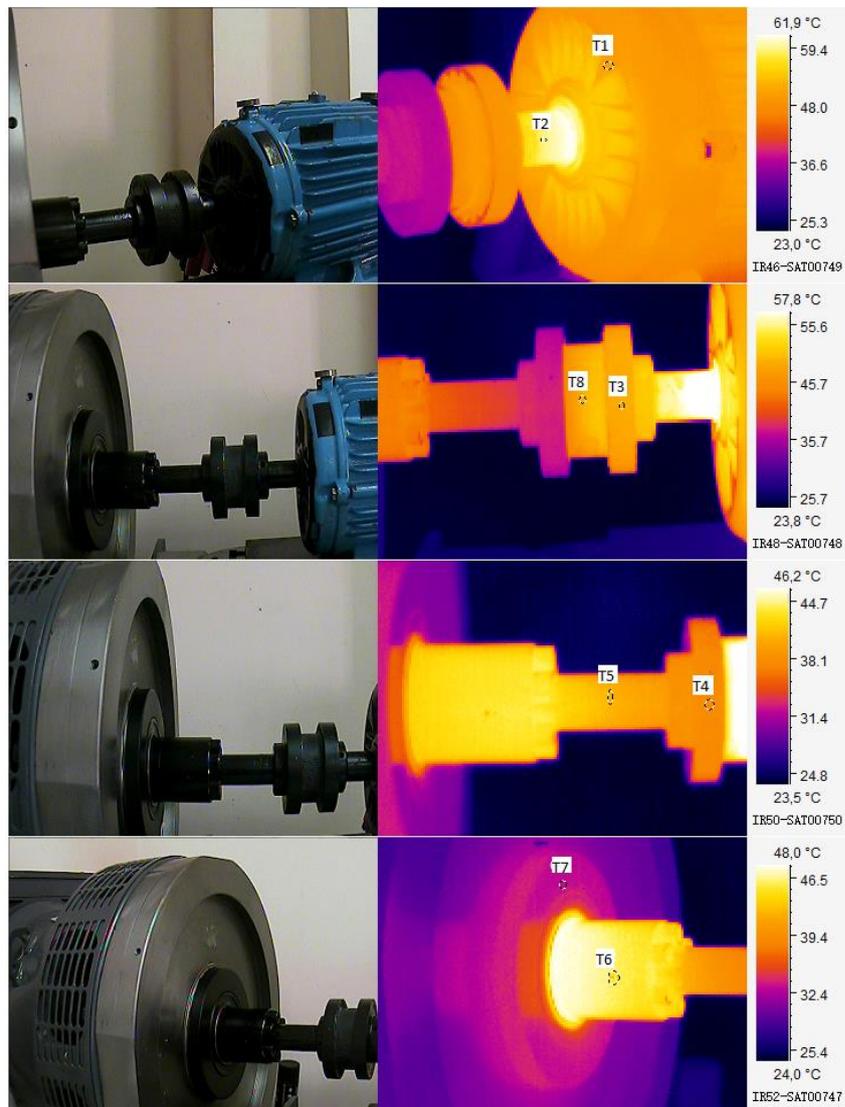


Image Info	Value
Min Temp	22,9°C
Emissivity	0,95
Max Temp	62,5°C
Ambient Temp	22,0°C
T1: Avg Temp	51,3°C
T2: Avg Temp	59,3°C
T3: Avg Temp	49,6°C
T4: Avg Temp	38,5°C
T5: Avg Temp	41°C
T6: Avg Temp	46°C
T7: Avg Temp	34,3°C
T8: Avg Temp	50,2°C

ANEXO L: TERMOGRAFÍA AtD DESALINEACIÓN ANGULAR

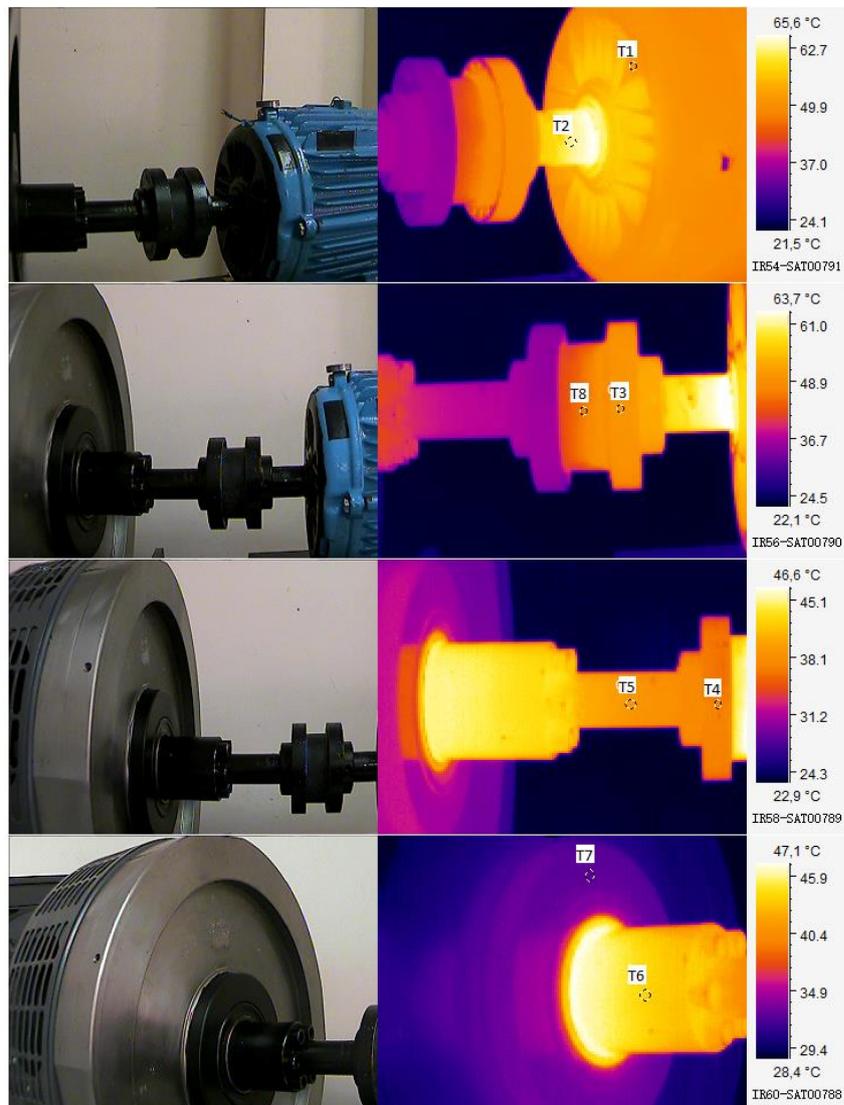


Image Info	Value
Min Temp	21,5°C
Emissivity	0,95
Max Temp	66,3°C
Ambient Temp	21,0°C
T1: Avg Temp	53,1°C
T2: Avg Temp	63,1°C
T3: Avg Temp	51,1°C
T4: Avg Temp	37,6°C
T5: Avg Temp	39,8°C
T6: Avg Temp	44,4°C
T7: Avg Temp	33,4°C
T8: Avg Temp	49,2°C

ANEXO M: TERMOGRAFÍA A+D DESALINEACIÓN COMBINADA

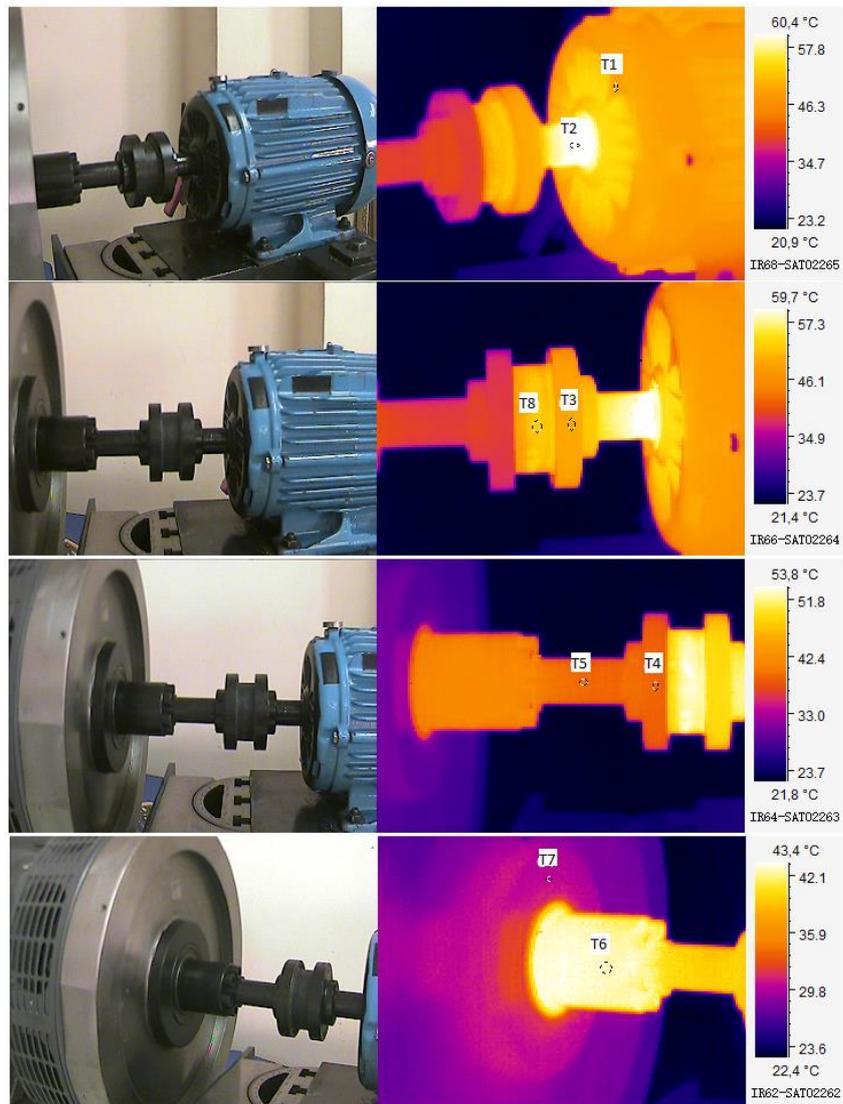


Image Info	Value
Min Temp	22,1°C
Emissivity	0,95
Max Temp	62,8°C
Ambient Temp	22,0°C
T1: Avg Temp	50,1°C
T2: Avg Temp	61,5°C
T3: Avg Temp	50,2°C
T4: Avg Temp	40,2°C
T5: Avg Temp	40,4°C
T6: Avg Temp	42,8°C
T7: Avg Temp	31,6°C
T8: Avg Temp	53°C

ANEXO N: TERMOGRAFÍA ACP DESALINEACIÓN PARALELA

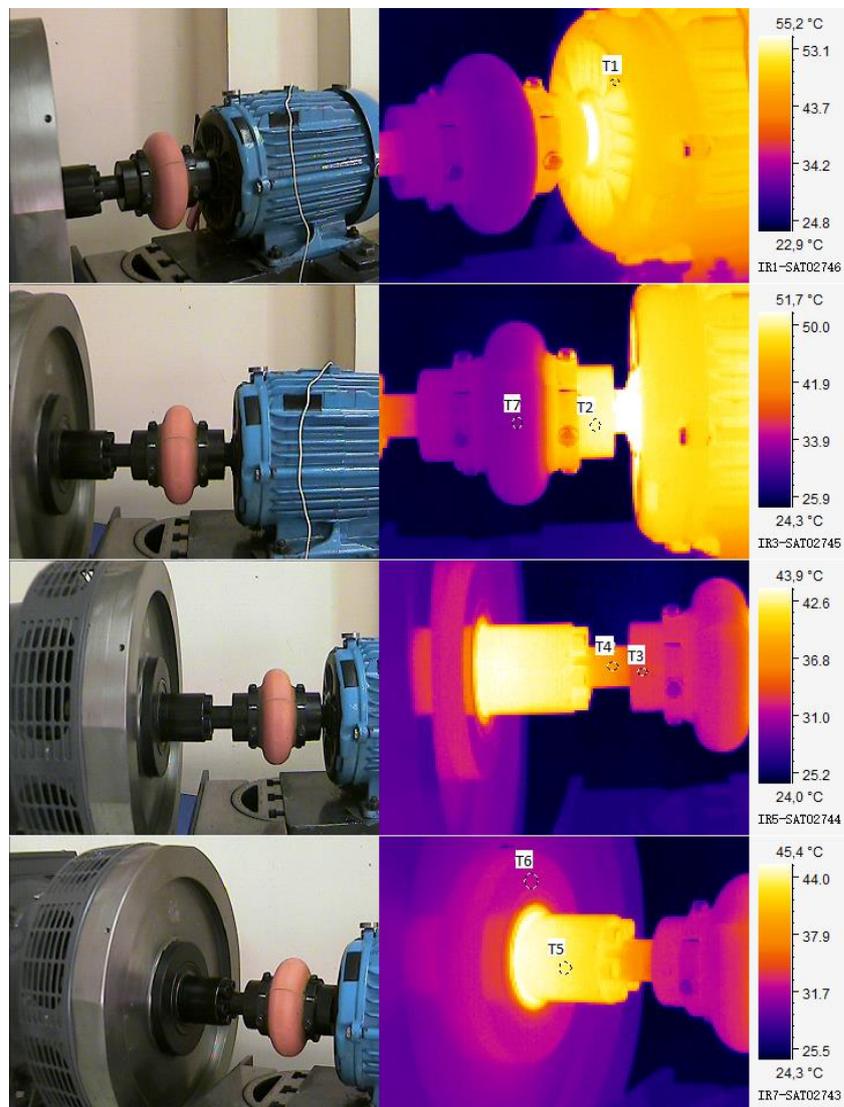


Image Info	Value
Min Temp	22,3°C
Emissivity	0,95
Max Temp	56°C
Ambient Temp	22,0°C
T1: Avg Temp	49,2°C
T2: Avg Temp	50,5°C
T3: Avg Temp	34,1°C
T4: Avg Temp	37,8°C
T5: Avg Temp	43,7°C
T6: Avg Temp	33,3°C
T7: Avg Temp	33,8°C

ANEXO O: TERMOGRAFÍA ACP DESALINEACIÓN ANGULAR

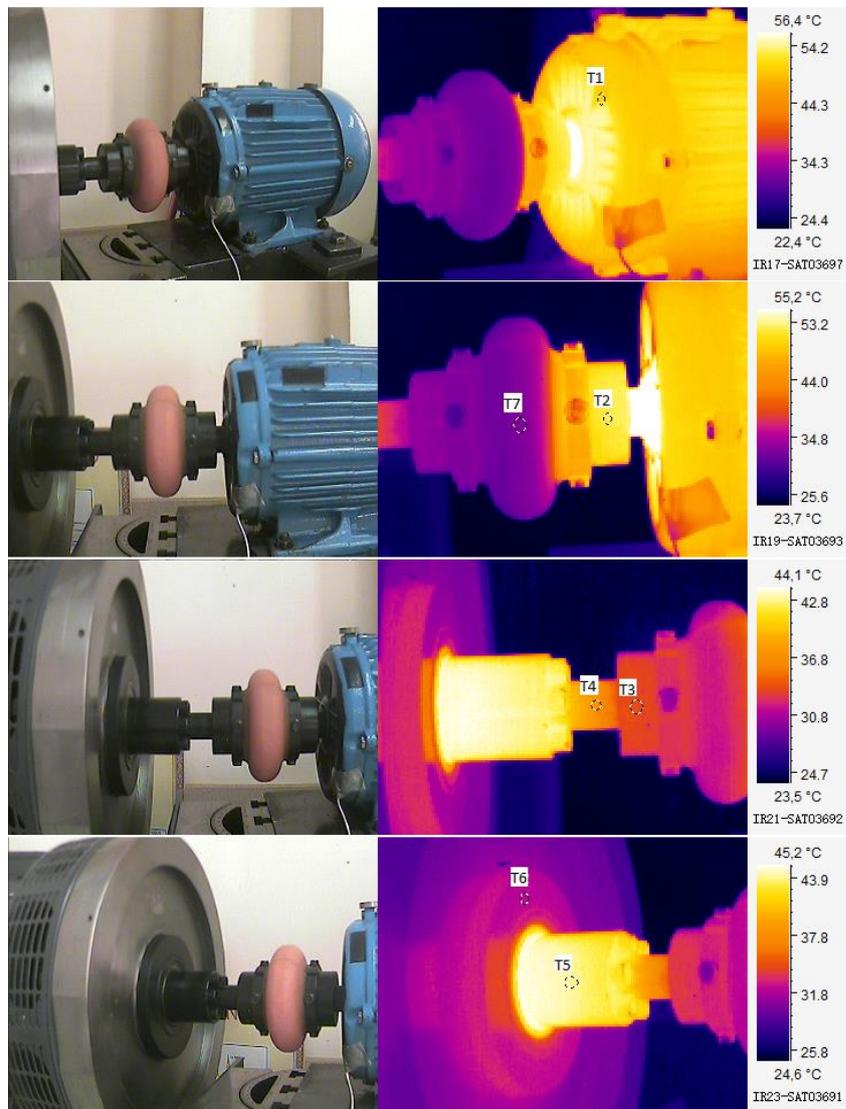


Image Info	Value
Min Temp	23,3°C
Emissivity	0,95
Max Temp	61,8°C
Ambient Temp	22,0°C
T1: Avg Temp	53°C
T2: Avg Temp	52,4°C
T3: Avg Temp	34,5°C
T4: Avg Temp	37,4°C
T5: Avg Temp	44,1°C
T6: Avg Temp	33,3°C
T7: Avg Temp	34,1°C

ANEXO P: TERMOGRAFÍA ACP DESALINEACIÓN COMBINADA

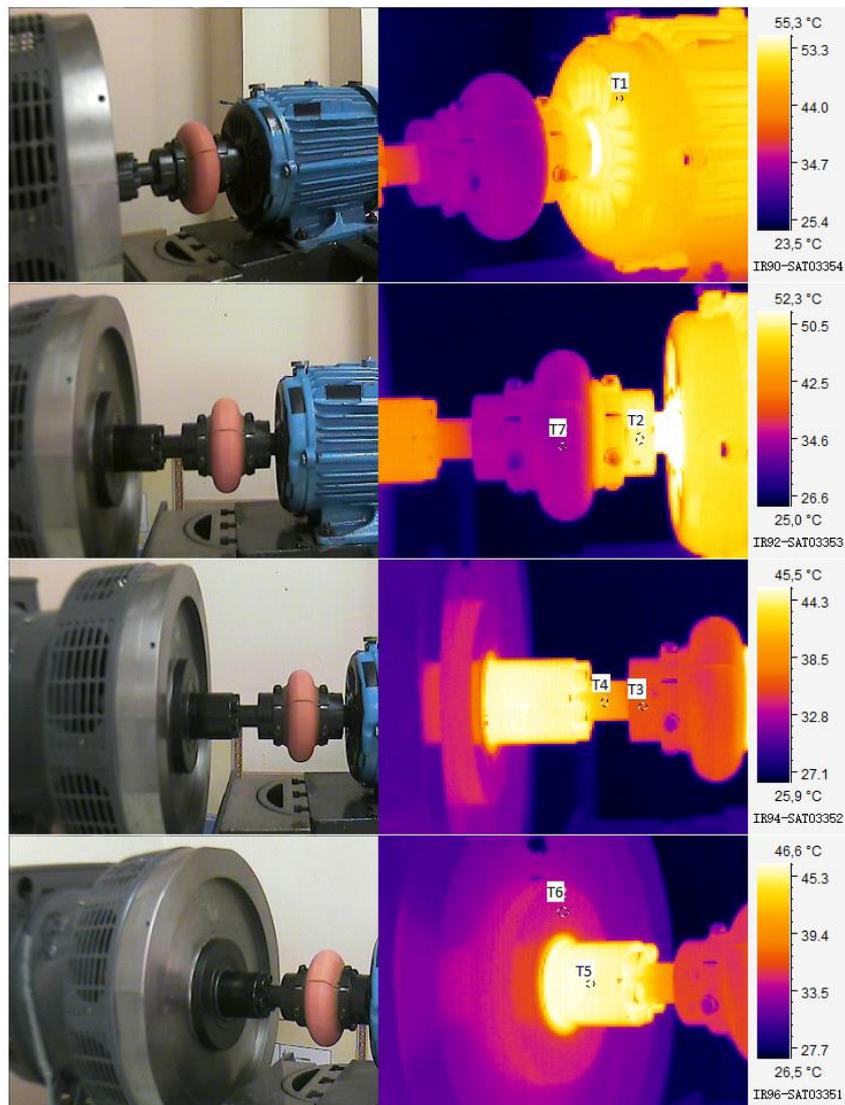


Image Info	Value
Min Temp	23,7°C
Emissivity	0,95
Max Temp	54,2°C
Ambient Temp	22,0°C
T1: Avg Temp	50,2°C
T2: Avg Temp	51°C
T3: Avg Temp	36,4°C
T4: Avg Temp	40,2°C
T5: Avg Temp	45,9°C
T6: Avg Temp	35,2°C
T7: Avg Temp	35,3°C