



**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL
MANTENIMIENTO PREDICTIVO EN LOS MOTORES CRÍTICOS DE
LA INDUSTRIA ALCOHOLERA DE PETROPAR SITUADA EN LA
CIUDAD DE MAURICIO JOSE TROCHE.**

Helber Miguel Villalba Paniagua

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAAGUAZU
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIAS
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD**

Coronel Oviedo - Paraguay

Año 2019

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL
MANTENIMIENTO PREDICTIVO EN LOS MOTORES CRÍTICOS DE
LA INDUSTRIA ALCOHOLERA DE PETROPAR SITUADA EN LA
CIUDAD DE MAURICIO JOSE TROCHE.**

Elaborado por

Helber Miguel Villalba Paniagua

Tutor

Ing. Federico Cabrera

Trabajo presentado a la Facultad de Ciencias y
Tecnología de la Universidad Nacional de Caaguazú,
como requisito para la obtención del título de Ingeniero en
Electricidad

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAAGUAZU
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIAS
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD**

Coronel Oviedo - Paraguay

Año 2019

PÁGINA DE APROBACIÓN

Trabajo de fin de grado para la obtención del Título de Ingeniero Electricista aprobado en representación de la Facultad Ciencias y Tecnología de la Universidad Nacional de Caaguazú, por el Tribunal Examinador constituido por los siguientes profesores.

Prof. Ing.

Prof. Ing.

Prof. Ing.

Dedicado a:

A mi madre Irene, por la confianza y el apoyo incondicional para culminar mis estudios. Brindando siempre su confianza y amor hacia mi persona.

Mi padre Tranquilino, por demostrar siempre su deseo de que pueda llegar al objetivo dándome la posibilidad de priorizar mis estudios.

Mis hermanas/o Blanca, Ector y María por estar siempre brindándome seguridad cariño y comprensión en todo momento.

A todos mis compañeros, por la hospitalidad y ayudas que siempre me pudieron brindar durante el transcurso de toda la carrera.

Agradecimientos:

Al Ing. Federico Cabrera, por su motivación, colaboración y disponibilidad de siempre.

Al Ing. Cesar Ferreira, por su orientación y corrección del proyecto.

Al Ing. Osvaldo Santacruz, por su orientación y ayuda.

Al Lic. Fredy Ayala, por facilitar datos y el acceso a la planta industrial.

A los docentes que durante la carrera impartieron sus conocimientos académicos y experiencias, lo que nos ha dado el aval de que seamos mejores personas y profesionales.

ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL MANTENIMIENTO PREDICTIVO EN LOS MOTORES CRÍTICOS DE LA INDUSTRIA ALCOHOLERA DE PETROPAR SITUADA EN LA CIUDAD DE MAURICIO JOSE TROCHE.

Helber Miguel Villalba Paniagua

RESUMEN

El objetivo de este proyecto consiste en estudiar la factibilidad de implementación del mantenimiento predictivo en los motores críticos de la industria alcoholera de Petropar en los sectores de Mesa alimentadora, Caldera y Captación de agua.

Se efectuó una recolección de datos, apuntando entre otros aspectos a las características y fallas típicas presentes en motores. Luego, tomando en consideración las fallas más frecuentes, se estudió las técnicas predictivas y sus procesos de inspección asociados. De este estudio resultaron seleccionadas las técnicas de vibración y termografía para la realización de las inspecciones. Posteriormente, se realizaron pruebas de vibraciones y termografía en los motores y sus tableros de alimentación. Fueron seleccionados los motores críticos de los sectores citados más arriba, analizándose las imágenes térmicas con el software SmartView y los rangos de vibraciones presentes con la norma ISO 10816 de acuerdo al espectro de frecuencia. Se encontraron, motores desalineados, contactos y rodamientos calientes. Finalmente, se realizó una evaluación económica del proyecto mediante un análisis de costo beneficio considerando los costos de implementación y la disminución de las pérdidas por paradas de producción. Se concluye que la implementación de las tecnologías de vibraciones y termografía en los 3 sectores críticos de la planta industrial, es una alternativa técnica y económicamente viable para aumentar la disponibilidad de la planta y disminuir pérdidas y paradas no programadas.

Palabras claves: Motores eléctricos, Mantenimiento predictivo, Paradas de producción, Análisis costo beneficio.

FEASIBILITY STUDY FOR THE IMPLEMENTATION OF PREDICTIVE MAINTENANCE IN THE CRITICAL ENGINES OF THE PETROPAR ALCOHOL INDUSTRY LOCATED IN THE CITY OF MAURICIO JOSE TROCHE.

Helber Miguel Villalba Paniagua

SUMMARY

The objective of this project is to study the feasibility of implementing predictive maintenance in the critical engines of Petropar's alcohol industry in the sectors of Feeding Table, Boiler and Water Collection.

A data collection was carried out, pointing out, among other aspects, the typical characteristics and faults present in engines. Then, taking into consideration the most frequent failures, the predictive techniques and their associated inspection processes were studied. From this study, the vibration and thermography techniques were selected to carry out the inspections. Subsequently, vibration and thermography tests were performed on the engines and their power boards. The critical motors of the sectors mentioned above were selected, analyzing the thermal images with the SmartView software and the vibration ranges present with the standard ISO 10816 according to the frequency spectrum. Misaligned motors, contacts and hot bearings were found. Finally, an economic evaluation of the project was carried out by means of a cost-benefit analysis considering the implementation costs and the reduction of losses due to production stoppages. It is concluded that the implementation of vibration and thermography technologies in the 3 critical sectors of the industrial plant is a technically and economically viable alternative to increase plant availability and reduce losses and unscheduled shutdowns.

Keywords: Electric motors, Predictive maintenance Production stoppages, cost benefit analysis.

CONTENIDO

PÁGINA DE APROBACIÓN	i
<i>Dedicado a:</i>	ii
<i>Agradecimientos:</i>	iii
CONTENIDO	vi
LISTA DE FIGURAS	xvi
LISTA DE TABLAS	xxiii
LISTA DE ABREVIATURAS	xxvi
I. INTRODUCCIÓN	1
II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	3
CAPÍTULO 1. Concepto de Mantenimiento	3
1.1. Mantenimiento.....	3
1.1.1. Mantenimiento Correctivo	3
1.1.2. Mantenimiento Preventivo.....	3
1.1.3. Mantenimiento Predictivo	5
1.2. Objetivo del Mantenimiento en una Instalación Industrial.....	8
CAPÍTULO 2. Motores Electricos	9
2.1. Motor eléctrico trifásico	9
2.2. Partes del motor eléctrico trifásico	9
2.2.1. El estator	10
2.2.2. El rotor.....	10
2.2.3. Los escudos	11
2.3. Funcionamiento	11
2.4. Tipos y características del motor eléctrico	12
2.4.1. Motores sincrónicos	12

2.4.1.1. Motor de rotor de polos lisos.....	13
2.4.1.2. Motor de rotor de polos salientes.....	13
2.4.2. Motores asíncronos.....	14
2.5. Características del motor eléctrico.....	15
2.5.1. Frecuencia de giro.....	15
2.5.2. Par.....	16
2.5.3. Potencia.....	17
2.5.4. Par de polos.....	19
2.5.5. Rendimiento.....	21
CAPÍTULO 3. Tecnología Predictiva por Termografía.....	22
3.1. Termografía infrarroja.....	22
3.2. La cámara termográfica.....	22
3.3. Que son los infrarrojos.....	23
3.4. Emisión, reflexión y transmisión.....	25
3.4.1. Emisión.....	25
3.4.2. Reflexión (ρ).....	26
3.4.3. Transmisión (T).....	27
3.5. Uso de la termografía en mantenimiento predictivo.....	27
3.6. Ventajas de la inspección por termografía.....	29
3.7. Proceso de inspección y condiciones a tener en cuenta.....	29
3.7.1. Encuadre de la imagen.....	30
3.7.2. Enfoque.....	30
3.7.3. Ajuste del rango de temperatura.....	30
3.7.4. Cuidado con las condiciones meteorológicas.....	31
3.7.5. El entorno del objeto.....	31

3.7.6. La atmosfera	31
3.7.7. Compensación de ambos efectos	32
3.8. Conclusiones a partir de la imagen térmica	34
3.8.1. Análisis cualitativo	34
3.8.2. Análisis cuantitativo	35
3.9. Errores del termógrafo	35
3.9.1. La cámara y su uso	35
3.9.2. Resolución y óptica	36
3.9.3. Toma de la imagen.....	36
3.9.4. Punto frío y punto caliente	36
3.9.5. El enfoque	36
CAPÍTULO 4. Tecnología Predictiva por Vibraciones	38
4.1. Vibraciones	38
4.2. Característica de las señales de vibraciones dinámicas.....	38
4.2.1. Señales Armónicos.....	39
4.2.2. Análisis armónico - Análisis de Fourier.....	44
4.2.3. Modulación de señales.....	46
4.2.4. Modulación en frecuencia.....	49
4.2.4.1. Casos comunes de FM en máquinas rotativas.....	51
4.2.4.1.1. En engranajes	51
4.2.4.1.2. En Motores electricos.....	52
4.3. Vibraciones en motores de inducción	53
4.3.1. Corrimiento del centro magnético.....	56
4.3.2. Roturas de barras en el rotor.....	56
4.3.3. Corto circuito en el enrollamiento del estator	57
4.3.4. Deformaciones térmicas.....	58
4.3.5. Pulsos torsionales	59

4.4. Instrumentos para la medición de vibraciones	59
4.4.1. Sonda de desplazamiento	60
4.4.2. Captador de velocidad (velocímetro)	61
4.4.3. Acelerómetro	61
4.5. Procedimiento y aspecto a tener en cuenta durante la inspección	62
4.5.1. Ubicación de los puntos de prueba	62
4.5.2. Orientación de los sensores de vibración	63
4.5.2.1 Numeración del canal del sensor de vibración	64
4.5.2.2 Mediciones triaxiales	65
4.5.3. Ejemplos de orientación	67
4.5.4. Montaje	67
4.5.4.1 Preparación de la superficie	68
4.5.4.2 Preparación del adhesivo	69
4.5.4.3 Orientación de la base	69
4.6. Estrategias de prueba para inspecciones de vibración	70
4.6.1. Condiciones de prueba	70
4.6.2. Condiciones de operación	71
4.6.2.1 Calentamiento	72
4.6.2.2 Inspección visual	72
4.6.2.3. Preparación de la máquina para el análisis de vibraciones	72
4.6.2.4. Inspeccione la máquina	73
4.6.2.5. Rangos de severidad de vibraciones	74
4.6.2.6. Niveles de tendencia	76
CAPÍTULO 5. Proceso de Producción y Características de Motores	38
5.1. Descripción de procesos	78
5.1.1. Sector molienda (Mesa alimentadora)	78
5.1.1.1. Esquema de disposición de motores	79

5.1.1.2. Característica de motores	79
5.1.2. Sector caldera (exhaustor izquierdo, derecho)	80
5.1.2.1. Esquema de disposición de motores	80
5.1.2.2. Característica de motores	81
5.1.3. Sector captación de agua	81
5.1.3.1. Esquema de disposición de motores	82
5.1.3.2. Característica de motores	83
CAPÍTULO 6. Evaluacion Economica	84
6.1. Método de Evaluación	84
6.1.1. Valor Presente Neto (VPN)	84
6.1.2. Tasa Interna de Rendimiento (TIR)	85
6.1.3. Periodo de retorno de inversión (PRI)	86
6.1.4. Análisis de sensibilidad	86
I. RESUMEN EJECUTIVO	87
CAPITULO 7. Resumen Ejecutivo	87
7.1. Descripción del trabajo	87
7.1.1. Métodos y Técnicas utilizadas.....	88
7.2. Justificación	88
7.3. Finalidad del proyecto.....	89
7.4. Metas	89
7.5. Objetivos	89
7.5.1. Objetivos generales	89
7.5.2. Objetivos específicos	90
7.6. Beneficiarios	90
7.7. Producto	90
7.8. Localización física y cobertura espacial.....	91
7.9. Especificaciones de actividades y tareas realizadas	91

7.10. Recursos necesarios	92
7.10.1. Recursos humanos	92
7.10.2. Recursos materiales.....	92
7.11. Factibilidad técnica.....	93
7.12. Factibilidad económica.....	93
7.12.1. Beneficios.....	93
7.12.1.1. Reducción de tiempos de parada	93
7.12.1.1.1. Promedio de parada periodo 2016 y 2017	94
7.12.1.1.2. Perdidas por parada de producción	94
7.12.2. Comparativo de costos para inversión	94
7.12.2.1. Costos de inversión en adquisición de equipos para efectuar pruebas	94
7.12.2.2. Costos de inversión contratando los servicios de inspección.....	95
7.12.2.3. Elección de método de inspección	95
7.12.3. Evaluación económica	95
7.12.3.1. Determinación del flujo de caja proyectada	95
7.12.3.2. Determinación de la tasa interna de rendimiento (TIR).....	96
7.12.3.3. Determinación del valor presente neto (VPN).....	96
7.12.3.4. Determinación del periodo de recuperación de la inversión (PRI) .	97
II. INGENIERÍA DE DISEÑO	98
CAPITULO 8. Ingenieria de Diseño	98
8.1. Reconocimiento de las instalación y ubicación	98
8.1.1. Procesos críticos de producción	98

8.1.2. Fallas típicas en motores de la industria	99
8.1.2.1. Comparativo horas de zafras y horas de parada.....	99
8.1.2.2. Comparativo horas de zafras y horas de parada.	100
8.1.2.3. Tabla comparativa de tecnologías predictivas.	101
8.2. Propuesta de inspección predictiva	101
8.3. Análisis por vibraciones	102
8.3.1. Alcance de la inspección	102
8.3.2. Método de colecta de datos	103
8.3.3. Criterios de alarma y severidad	103
8.3.4. Implicancia de niveles de alarmas.....	105
8.4. Inspección térmica.....	106
8.4.1. Alcance de la inspección	106
8.4.2. Método de colecta de datos	107
8.4.2.1. Cámara termográfica Ti125.....	107
8.4.2.2. Software de análisis SmartView.....	107
8.4.3. Criterio de alarma y severidad.....	108
8.5. Informe del análisis por vibraciones.....	110
8.5.1. Exhaustor izquierdo.....	111
8.5.1.1. Espectro en frecuencia 0-1000 Hz.....	112
8.5.2. Exhaustor derecho	113
8.5.2.1. Espectro en frecuencia 0-1000 Hz.....	114
8.5.3. Captación de agua motor 1	115
8.5.3.1. Espectro en frecuencia 0-1000 Hz.....	116
8.5.4. Captación de agua motor 2	117
8.5.4.1. Espectro en frecuencia 0-1000 Hz.....	118
8.5.5. Captación de agua motor 4	119

8.5.5.1. Espectro en frecuencia 0-1000 Hz.....	120
8.5.6. Captación de agua motor 5	121
8.5.6.1. Espectro en frecuencia 0-1000 Hz	122
8.6. Informe inspección por termografía	123
8.6.1. Mesa alimentadora	124
8.6.1.1. Motor mesa alimentadora.....	124
8.6.1.1.1. Resumen de la imagen térmica	125
8.6.1.2. Tablero motor mesa alimentadora.....	126
8.6.1.2.1. Resumen de la imagen térmica.....	127
8.6.2. Exhaustor izquierdo.....	128
8.6.2.1. Motor exhaustor izquierdo	128
8.6.2.1.1. Resumen de la imagen térmica	129
8.6.2.2. Tablero exhaustor izquierdo	130
8.6.2.2.1. Resumen de la imagen térmica	131
8.6.2.2.2. Resumen de la imagen térmica	133
8.6.3. Exhaustor derecho	134
8.6.3.1. Motor exhaustor derecho	134
8.6.3.1.1. Resumen de la imagen térmica	135
8.6.3.2. Tablero exhaustor derecho.....	136
8.6.3.2.1. Resumen de la imagen térmica.....	137
8.6.3.2.2. Resumen de la imagen térmica.....	139
8.6.4. Captación de agua motor 1	140
8.6.4.1. Motor captación 1	140
8.6.4.1.1. Resumen de la imagen térmica.....	141
8.6.4.1.2. Resumen de la imagen térmica.....	142
8.6.4.2. Tablero motor captación 1	143
8.6.4.2.1. Resumen de la imagen térmica.....	144

8.6.5. Captación de agua motor 2	145
8.6.5.1. Motor captación 2	145
8.6.5.1.1. Resumen de la imagen térmica.....	146
8.6.5.2. Tablero motor captación 2	147
8.6.5.2.1. Resumen de la imagen térmica.....	148
8.6.6. Captación de agua motor 4	149
8.6.6.1. Motor captación 4	149
8.6.6.1.1. Resumen de la imagen térmica.....	150
8.6.6.1.2. Motor captación 4	151
8.6.6.2. Tablero motor captación 4	152
8.6.6.2.1. Resumen de la imagen térmica.....	153
8.6.7. Captación de agua motor 5	154
8.6.7.1. Motor captación 5	154
8.6.7.1.1. Motor captación 5	155
8.6.7.2. Tablero motor captación 5	156
8.6.7.2.1. Resumen de la imagen térmica.....	157
8.7. Análisis de las técnicas de inspección	157
8.8. Propuesta de inspección.....	158
IX. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	160
X. CONCLUSIONES	162
XI. RECOMENDACIONES.....	163
XII. APÉNDICE	164
Apéndice A: Resumen ejecutivo	164
Apéndice A.1: Localización, cobertura espacial del proyecto.	165
Apéndice A.2: Sectores de la planta industrial.....	167
Apéndice A.3: Promedio de horas parada por cada zafra.	173

Apéndice A.4: Costos de implementación de las tecnologías predictivas.	179
Apéndice B: Ingeniería de diseño.....	182
Apéndice B.1: Sector crítico de producción mesa alimentadora.....	183
Apéndice B.2: Sector crítico de producción caldera.	185
Apéndice B.3: Sector crítico de producción captación de agua.....	187
Apéndice B.4: Inspección de termografía en motores y tableros.....	190
Apéndice B.5: Inspección de vibraciones en motores.	192
Apéndice B.6: Proceso de análisis de la inspección por termografía	194
Apéndice C: Evaluación económica.	195
Apéndice C.1: Determinación de la Tasa Interna de Retorno (TIR), Valor Actual Neto (VPN) y el Periodo de Retorno de la inversión (PRI).	196
BIBLIOGRAFÍA.....	199

LISTA DE FIGURAS

CAPITULO 1

Figura 1.1: Curva de la tina4

Figura 1.2: Curva de tendencia7

CAPITULO 2

Figura 2.1: Transportador de material pesado.....9

Figura 2.2: Partes del motor eléctrico trifásico..... 10

Figura 2.3: Rotor jaula de ardilla..... 10

Figura 2.4: Rotor de polos lisos.. 13

Figura 2.5: Rotor de polos salientes.. 14

Figura 2.6: Motor de inducción asíncrono..... 14

Figura 2.7: Estator de un motor asíncrono.. 15

Figura 2.8: Ley de la palanca.. 17

Figura 2.9: La potencia de un motor se da en HP o en watts..... 18

Figura 2.10: Barra imán..... 19

Figura 2.11: Motor con dos pares de polos.. 20

CAPITULO 3

Figura 3.1: Imagen térmica..... 22

Figura 3.2: Cámara termográfica..... 23

Figura 3.3: Temperatura de colores 24

xvi

Figura 3.4: Emisión Reflexión y Transmisión.....	25
Figura 3.5: Emisión.....	26
Figura 3.6: Reflexión.....	27
Figura 3.7: Distribución de temperatura dentro de un tablero.....	28
Figura 3.8: Emisión y reflejo de radiaciones.....	32

CAPITULO 4

Figura 4.1: Representación temporal del movimiento armónico e indicación de los parámetros relevantes Imagen térmica	39
Figura 4.2: Representación vectorial del movimiento armónico	41
Figura 4.3: Representación gráfica de un batido	44
Figura 4.4: Representación de una señal compleja, sus componentes y su espectro.....	46
Figura 4.5: Espectro de frecuencia de una señal AM con portadora.....	49
Figura 4.6: Espectro de frecuencia de una señal FM (a) y (b) Señal en el tiempo (c) Zoom en el tiempo, (d) espectro.....	52
Figura 4.7: Comparación entre (a) Batido, (b) AM, (c) FM.....	53
Figura 4.8: Fallos característicos de motores de inducción.....	54
Figura 4.9: Espectro zoom alrededor de la frecuencia de 60 Hz	57
Figura 4.10: Espectro de las vibraciones en un motor de 1740 rpm con cortocircuito en algunas espiras de sus polos	58
Figura 4.11: Sonda de desplazamiento	60

Figura 4.12: Acelerómetro..	62
Figura 4.13: Ubicación de acelerómetro.....	63
Figura 4.14: Ilustración de punto de muestreo..	65
Figura 4.15: Alineación de ejes de vibración..	66
Figura 4.16: Para máquinas verticales R es Radial, T es Tangencial y A es Vertical..	67
Figura 4.17: Sensor en una sola dirección..	68
Figura 4.18: Punto de hendidura..	70
Figura 4.19: Nivel de tendencia de vibraciones.	77
CAPITULO 5	
Figura 5.1: Motores de la cinta transportadora.....	79
Figura 5.2: Motor exhaustor.....	80
Figura 5.3: Sector captación.....	82
CAPITULO 7	
Figura 7.1: Gráfico de flujo de caja proyectada	98
Figura 7.2: Valor acumulado.....	97
CAPITULO 8	
Figura 8.1: Comparativo horas de zafra vs horas de parada.....	100
Figura 8.2: Analizador de vibraciones.	103
Figura 8.3: Cámara termográfica.....	107

Figura 8.4: Software de análisis SmartView.....	108
Figura 8.5: Vista general de espectro Motor - Exhaustor izquierdo.....	112
Figura 8.6: Vista ampliada en zona de análisis Motor - Exhaustor izquierdo.....	112
Figura 8.7: Vista general de espectro Motor - Exhaustor derecho.....	114
Figura 8.8: Vista ampliada en zona de análisis Motor - Exhaustor derecho.....	114
Figura 8.9: Vista general de espectro Motor bomba 1 - Captación	116
Figura 8.10: Vista ampliada en zona de análisis Motor bomba 1 - Captación	116
Figura 8.11: Vista general de espectro Motor bomba 2 - Captación	118
Figura 8.12: Vista ampliada en zona de análisisMotor bomba 2 - Captación	118
Figura 8.13: Vista general de espectro Motor bomba 4 - Captación.....	120
Figura 8.14: Vista ampliada en zona de análisisMotor bomba 4 - Captación	120
Figura 8.15: Vista general de espectro Motor bomba 5 - Captación.....	122
Figura 8.16: Vista ampliada en zona de análisisMotor bomba 5 - Captación... ..	122
Figura 8.17: Imagen real y térmica del motor sector mesa alimentadora	124
Figura 8.18: Variación de temperatura del motormesa alimentadora	124
Figura 8.19: Imagen real y termica conductor tableromesa alimentadora.	126
Figura 8.20: Variación de temperatura del conductor tablero mesa alimentadora.	126
Figura 8.21: Imagen real y térmica del motor exhaustor izquierdo.	128
Figura 8.22: Variación de temperaturamotor exhaustor izquierdo	128
Figura 8.23: Imagen real y termica conductor tablero exhaustor izquierdo	130

Figura 8.24: Imagen real y termica conductor fusible y contactos exhaustor izquierdo.....	132
Figura 8.25: Variación de temperatura fusible y contactoexhaustor izquierdo.....	132
Figura 8.26: Imagen real y térmica del motor exhaustor derecho.....	134
Figura 8.27: Variación de temperatura motor exhaustor derecho.....	134
Figura 8.28: Imagen real y termica conductor y contactos exhaustor derecho.....	136
Figura 8.29: Imagen real y termica fusible y contactos exhaustor derecho..	138
Figura 8.30: Variación de temperatura fusible y contactos tablero exhaustor derecho	138
Figura 8.31: Imagen real y térmica del motor 1 captación.....	140
Figura 8.32: Variación de temperatura motor captación 1 captación	140
Figura 8.33: Imagen real y térmica acople motor 1 captación ...	142
Figura 8.34: Imagen real y termica fusible y contactos tablero motor 1 captación.	143
Figura 8.35: Imagen real y térmica del motor 2 captación.....	145
Figura 8.36: Variación de temperatura captación.....	145
Figura 8.37: Imagen real y termica fusible y contactos tablero motor 2 captación.	147
Figura 8.38: Variación de temperatura tablero motor 2 captación.....	147
Figura 8.39: Imagen real y térmica del motor 4 captación.....	149
Figura 8.40: Imagen real y térmica lado rodamiento del motor 4 captación	151
Figura 8.41: Imagen real y termica de conductores y contactos tablero motor 4 captación... ..	152

Figura 8.42: Imagen real y térmica del motor 5captación.....	154
Figura 8.43: Imagen real y termica de conductores y contactos tablero motor 5 captación.....	156

VIII. APÉNDICE

APÉNDICE A

Figura A.1.1: Localización de la planta industrial en la Ciudad de Mauricio José Troche.	165
Figura A.1.2: Vista aérea de la planta industrial Petropar.....	166
Figura A.2.1: Sectores de producción de la planta industrial.....	167
Figura A.2.2: Sector recepción de materia prima.	168
Figura A.2.3: Acceso principal en la planta alcoholera.	169
Figura A.2.4: Imagen de camiones en proceso de descarga.....	170
Figura A.2.5: Sector destilería.	171
Figura A.2.6: Sector stock de repuestos de motores.....	172
Figura A.3.1: Comparativo horas de parada.....	173

APÉNDICE B

Figura B.1.1: Sector de producción mesa alimentadora.....	183
Figura B.1.2: Motor crítico del sector mesa alimentadora.....	184
Figura B.2.1: Motor crítico del sector caldera.	185
Figura B.2.2: Amperímetro en tablero del motor sector caldera.	186

Figura B.3.1: Sector captación a orillas del rio Tebicuary.....	187
Figura B.3.2: Motores críticos del sector captación.	188
Figura B.3.3: Tablero de uno de los motores críticos de captación.	189
Figura B.4.1: Inspección térmica en motores críticos.	190
Figura B.4.2: Inspección térmica en tableros de motores críticos.	191
Figura B.5.1: Proceso de inspección por vibraciones.	192
Figura B.5.2: Orientación del punto de prueba del acelerómetro.	193
Figura B.6.1: Software de análisis SmartView.....	194
APÉNDICE C	
Figura C.1: Método del VPN con tasa de descuento 12%.....	197

LISTA DE TABLAS

CAPITULO 4

Tabla 4.1: Numeración de canales	64
Tabla 4.2: Cuadro de severidad de vibraciones	74

CAPITULO 5

Tabla 5.1: Características motor 1,2.....	79
Tabla 5.2: Características motor 1,2.....	81
Tabla 5.3: Características motores captación de agua.....	83

CAPITULO 8

Tabla 8.1: Comparativo vibraciones y termografía	101
Tabla 8.2: Severidad de vibraciones criterio norma ISO 10816, para el caso de equipos sin historial (No transportadores)	104
Tabla 8.3: Niveles de alarmas	105
Tabla 8.4: Rangos de severidad de anomalías térmicas según la norma NETA (International Electrical Testing Association) a lo especificado, para el caso de equipos sin historial (No transportadores).....	109
Tabla 8.5: Característica motor exhaustor izquierdo	111
Tabla 8.6: Característica motor exhaustor derecho	113
Tabla 8.7: Característica motor 1 captación de agua	115
Tabla 8.8: Característica motor 2 captación de agua	117
Tabla 8.9: Característica motor 4 captación de agua	119
Tabla 8.10: Característica motor 5 captación de agua	121
Tabla 8.11: Temperatura del motor mesa alimentadora.....	124
Tabla 8.12: Temperaturas del conductor en tablero mesa alimentadora.....	127
Tabla 8.13: Análisis de temperatura tablero mesa alimentadora.....	127

xxiii

Tabla 8.14: Temperatura del motor exhaustor izquierdo	128
Tabla 8.15: Temperatura del conductor tablero exhaustor izquierdo.....	130
Tabla 8.16: Análisis de temperatura tablero exhaustor izquierdo	131
Tabla 8.17: Temperatura conductor fusible y contactos tablero exhaustor izquierdo	132
Tabla 8.18: Análisis de temperatura fusible y contactos tablero exhaustor izquierdo	133
Tabla 8.19: Temperatura del motor exhaustor derecho.....	134
Tabla 8.20: Temperatura de conductor y contactos exhaustor derecho	136
Tabla 8.21: Análisis de temperatura tablero exhaustor derecho.....	137
Tabla 8.22: Temperatura de contactos y fusible tablero exhaustor derecho	138
Tabla 8.23: Análisis de temperatura fusible y contactos tablero exhaustor derecho	139
Tabla 8.24: Temperatura del motor 1 captación	140
Tabla 8.25: Temperatura acople motor 1 captación	142
Tabla 8.26: Temperaturas de fusibles y contactos tablero motor 1 captación	143
Tabla 8.27: Analisis de temperatura tablero motor 1 captación.....	144
Tabla 8.28: Temperatura del motor 2 captación	146
Tabla 8.29: Temperatura fusible y contactos tablero motor 2 captación	148
Tabla 8.30: Analisis de temperatura tablero motor 2 captación.....	148
Tabla 8.31: Temperatura del motor 4 captación	149
Tabla 8.32: Temperatura lado rodamiento del motor 4 captación	151
Tabla 8.33: Temperatura conductores y contactos tablero motor 4 captación	152
Tabla 8.34: Analisis de temperatura tablero motor 4 captación.....	153
Tabla 8.35: Temperatura del motor 5 captación	154
Tabla 8.36: Temperatura conductores y contactos tablero motor 5 captación	156
Tabla 8.37: Analisis de temperatura tablero motor 5 captación.....	157

Tabla 8.38: Propuesta de mantenimiento	159
Tabla 8.39: Periodo de inspección térmica.....	159
Tabla 8.40: Periodo de inspección por vibracion	159

VIII. APÉNDICE

APÉNDICE A

Tabla A.3.1: Horas de parada.....	176
Tabla A.3.2: Caña de azucar no procesadas.....	177
Tabla A.3.3: Alcohol absoluto no elaborado	177
Tabla A.3.4: Perdidas por parada.....	178
Tabla A.4.1: Plan de inversion proyectada	179
Tabla A.4.2: Costo de inspeccion por punto	180
Tabla A.4.3: Numero de muestras por equipo	180
Tabla A.4.4: Costo total de inspección por motor - tablero.....	180
Tabla A.4.5: Comparativo de costos.....	181

APÉNDICE C

Tabla C.1: Flujo de caja proyectada de las inversiones previstas	196
Tabla C.2: Periodo de recuperaci3n de la inversi3n	198

LISTA DE ABREVIATURAS

PETROPAR: Petróleos Paraguayos.

MW: Megavatio.

RPM: Revoluciones por minuto.

HP: Caballo de fuerza (Horse Power).

Pab = Potencia de salida.

Pzn = Potencia de entrada.

LCD: Representación visual por cristal líquido (Liquid Crystal Display).

PVC: Policloro de vinilo.

Trefl: Temperatura reflejada.

Tamb: Temperatura ambiente.

Hz: Ciclos por segundo.

FFT: Transformada rápida de Fourier.

AM: Amplitud modulada.

FM: Frecuencia modulada.

RAT: Radial Axial Tangencial.

RTA: Radial Tangencial Axial.

ART: Axial Radial Tangencial.

ATR: Axial Tangencial Radial.

TAR: Tangencial Axial Radial.

TRA: Tangencial Radial Axial.

FSM: Factor de servicio para las clases de máquinas.

FSN: Factor de servicio para los niveles.

KW: Kilovoltio.

VPN: Valor presente neto.

TIR: Tasa interna de retorno.

TMAR: Tasa mínima aceptable de rendimiento.

PRI: Periodo de retorno de inversión.

ISO: Organización internacional de estandarización.

NETA: Asociación internacional de pruebas eléctricas.

I. INTRODUCCIÓN

La tendencia actual en el ámbito industrial es contar con un servicio de calidad y confiabilidad en el sistema de producción, las nuevas tecnologías de mantenimiento permiten el monitoreo de las máquinas y detección de averías en sus inicios, que son indispensables hoy en día para tener un sistema garantizado de producción.

La presente investigación se refiere al estudio de factibilidad de implementación del mantenimiento predictivo en motores críticos de la planta alcoholera de Petropar, ya que la misma durante periodos de producción registra paradas no planificadas que reducen la producción de alcohol. Estas paradas son muy perjudiciales para la empresa ya que durante las mismas se registran grandes pérdidas económicas por la no facturación por venta de alcohol.

En dicha fábrica estatal es implementada solamente el mantenimiento preventivo, así como mantenimientos correctivos con las cuales no se evitan las paradas registradas durante los periodos de zafra. Los motores críticos de la alcoholera son muy vulnerables a cualquier tipo de fallas, tales como averías que ocasionan paradas por tiempos prolongados en la industria.

El proyecto que a continuación se presenta tiene un objetivo principal, definir la factibilidad de implementación del mantenimiento predictivo en los motores críticos de la planta industrial.

Con la ejecución de técnicas de mantenimiento como el predictivo en los motores de la industria alcoholera, se podrá reducir el nivel de vulnerabilidad en el sistema de producción garantizando la disponibilidad de los motores eléctricos permitiendo predecir fallas en las mismas, ayudando de esta manera a que la fábrica presente un mayor rango de confiabilidad en el sistema de

producción beneficiando así directamente a la planta industrial de la ciudad de Mauricio José Troche y también a los productores de caña de azúcar ya que dicho rubro mueve la economía de las zonas aledañas.

En el capítulo 1 se efectúa la revisión bibliográfica comenzando con la teoría de mantenimiento, prosiguiendo con los capítulos que contienen los siguientes contenidos: capítulo 2 con motores eléctricos su importancia usos y principales características, capítulo 3 describe la tecnología de inspección por termografía y sus procesos de inspección, el capítulo 4 prosigue con la tecnología predictiva por vibraciones sus procesos de inspección y características, en el capítulo 5 se describen los procesos críticos junto con las características de cada motor en estudio.

En el capítulo 7 se presenta el resumen ejecutivo del presente trabajo y en el capítulo 8 se detallan los resultados de las pruebas por termografía y vibraciones con los criterios de interpretación de resultados.

II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

CAPÍTULO 1

Conceptos de Mantenimiento

1.1. Mantenimiento

Se define habitualmente mantenimiento como el conjunto de técnicas destinado a conservar equipos e instalaciones industriales en servicio durante el mayor tiempo posible (buscando la más alta disponibilidad) y con el máximo rendimiento. [1]

1.1.1. Mantenimiento Correctivo

En esta estrategia la reparación solamente se lleva a cabo cuando aparecen averías que provocan la interrupción de la producción. Es un método fácil de implementar, pero provoca grandes costos por el paro de producción y conlleva riesgos para el personal de planta. [2]

Adicionalmente las reparaciones suelen ser de baja fiabilidad debido a la premura de tiempo en el momento de realizarlas.

1.1.2. Mantenimiento Preventivo

Desde el mantenimiento correctivo progresamos al mantenimiento periódico preventivo que a veces es llamado “mantenimiento histórico”. En este tipo se analizan las historias de cada máquina y se programan reparaciones periódicas antes de que ocurran los problemas que estadísticamente se pueden esperar. Ya se sabe desde hace mucho que grupos de máquinas similares van a tener proporciones de fallas que se pueden predecir hasta cierto punto, si se toman promedios durante un tiempo largo. Esto produce “la

curva de la tina” que relaciona la proporción de fallas al tiempo de operación de la manera siguiente [3]:

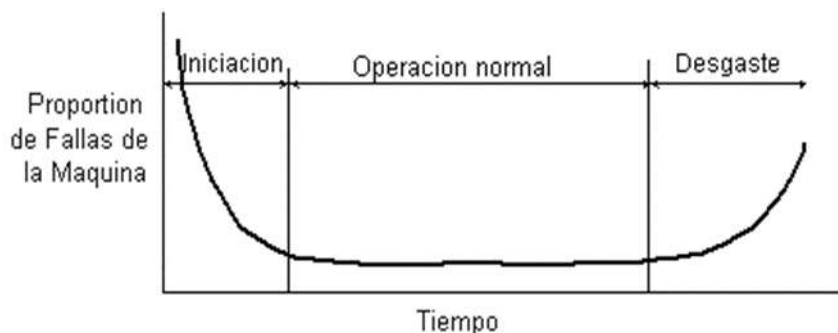


Figura 1.1: Curva de la tina.

Si esta curva es aplicable a todas las máquinas del grupo, y si la forma de la curva es conocida, se podría usar el mantenimiento preventivo de manera ventajosa, lamentablemente ese no es el caso en la práctica.

El mantenimiento preventivo también incluye actividades como el cambio del aceite y de los filtros y la limpieza e inspección periódica. La actividad de mantenimiento se puede planificar en base al tiempo del calendario o a horas de operación de la máquina, cantidad de partes producidas etc. El mantenimiento preventivo se hizo muy popular al principio de la década de los 80 cuando se empezó a usar pequeñas computadoras para la planificación y el registro de las actividades de mantenimiento.

En un estudio famoso acerca de mantenimiento preventivo por United y American Airlines, encontraron que, para un gran tipo de máquinas giratorias, la proporción de fallas se incrementaba de manera importante inmediatamente después de las reparaciones, en otras palabras, el reacondicionamiento provocaba una reducción de la confiabilidad de las máquinas. Es como si la

maquina regresa al inicio de la curva de la tina después de cada reacondicionamiento.

De este estudio y de observaciones posteriores, se dedujo que las reparaciones periódicas causaron 20% a 25% de las fallas al arrancar. Alrededor del 10% de esas fallas se pueden atribuir a rodamientos defectuosos.

Es obvio que el mantenimiento preventivo hace un uso ineficiente de los recursos para la mayoría de las máquinas. Pero hay casos en que se les puede usar con buenos resultados. Buenos ejemplos son las máquinas que tienen desgaste por el uso como trituradoras de rocas y de minerales, y maquinas sujetas a la corrosión como máquinas que manejan sustancias causticas [3].

1.1.3. Mantenimiento Predictivo

El siguiente paso en la tecnología de mantenimiento fue la llegada del mantenimiento predictivo, basado en la determinación del estado de la maquina en operación: La técnica está basada en el hecho que la mayoría de las partes de la maquina darán un tipo de aviso antes de que fallen.

De esta forma se puede decir que el mantenimiento predictivo o bajo condición, es la evaluación del estado de los componentes mecánicos o eléctricos mediante técnicas de seguimiento y análisis, permitiéndonos programar las operaciones de mantenimiento “solamente cuando son necesarias”. Consiste esencialmente en el estudio de ciertas variables o parámetros relacionado con el estado o condición del medio que mantenemos como por ejemplo la vibración, temperatura, aceites, aislamientos, etc. [4].

El estudio de estos parámetros nos suministra información del estado de sus componentes y, algo también muy importante, del modo en que está

funcionando dicho equipo, permitiéndonos no solo detectar problemas de componentes sino también de diseño y de instalación. El objetivo del mantenimiento predictivo es la reducción de los costos de operación y de mantenimiento incrementando la fiabilidad del equipo.

La base del mantenimiento predictivo radica en la monitorización de los equipos, ya que debemos evaluar los parámetros antes comentados con la instalación en funcionamiento normal. No es por tanto necesario hacer una parada para poder evaluar la condición de los mismos, conocemos el estado de nuestras maquinas mientras están trabajando.

Con las diferentes técnicas disponibles podemos evaluar los fallos en los componentes y seguir su evolución durante largos periodos de tiempo (a veces meses) antes de decidir nuestra intervención, de esta manera podemos coordinar con producción el momento más adecuado para la intervención de mantenimiento.

El grafico que mostramos a continuación es la mejor forma de entender en que consiste el mantenimiento predictivo. Se trata de un gráfico de tendencias en el que en el eje de ordenadas evaluamos uno de los parámetros que estemos midiendo (severidad de vibración, temperaturas, contaminantes, etc.) y en el eje de abscisas medimos tiempo, mientras la severidad de nuestro parámetro permanezca estable no tendremos porque preocuparnos (el equipo está bien), pero cuando esta comience a subir será un indicativo de que algo va mal.

Con técnicas de análisis podemos determinar con extraordinaria precisión la causa del daño. Mención particular merece el establecimiento de los límites de alerta y de fallo, debido a su clara importancia. Existen diversas formas de

establecerlos, siendo necesario siempre disponer de un histórico de medidas que nos permita realizar un estudio estadístico de las mismas [4].

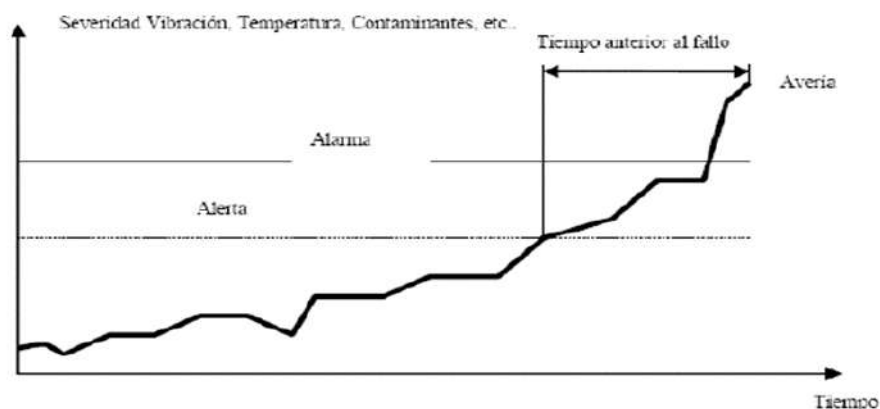


Figura 1.2: Curva de tendencia.

Las actuaciones con mantenimiento predictivo pasan por unos inconvenientes iniciales de elevados costos de inversión en tecnología y formación, con una rentabilidad de la misma a medio y largo plazo. Pero las ventajas son evidentes [4]:

- Conocemos el estado de la máquina en todo instante.
- Eliminamos prácticamente todas las averías.
- Solo paramos o intervenimos en la máquina cuando realmente es necesario.
- Conocemos el daño en los componentes desde una fase inicial del mismo, permitiéndonos programar su sustitución en el momento más conveniente.
- Al intervenir en la máquina conocemos el problema, reduciendo el tiempo de la reparación.

- Podemos identificar los fallos ocultos, así como la causa de fallos crónicos.
- Reducimos las piezas del almacén, adquiriéndolas cuando detectemos el problema en una fase primaria.
- Incrementamos la seguridad de la planta.

1.2. Objetivo del Mantenimiento en una Instalación Industrial

El objetivo fundamental de mantenimiento no es reparar urgentemente las averías que surjan. El departamento de mantenimiento de una industrial tiene cuatro objetivos que deben marcar y dirigir su trabajo [1].

- Cumplir un valor determinado de disponibilidad.
- Cumplir un valor determinado de fiabilidad.
- Asegurar una larga vida útil de la instalación en su conjunto, al menos acorde con el plazo de amortización de la planta.
- Conseguir todo ello ajustándose a un presupuesto dado, normalmente el presupuesto óptimo de mantenimiento para esa instalación.

CAPÍTULO 2

Motores Eléctricos

2.1. Motor eléctrico trifásico

Es una máquina eléctrica rotativa, capaz de convertir la energía eléctrica trifásica suministrada, en energía mecánica. La energía eléctrica trifásica origina campos magnéticos rotativos en el bobinado del estator (o parte fija del motor) [5].

Se emplean para accionar máquinas, herramientas, bombas, montacargas, ventiladores, grúas, maquinaria elevada, sopladores, etc.

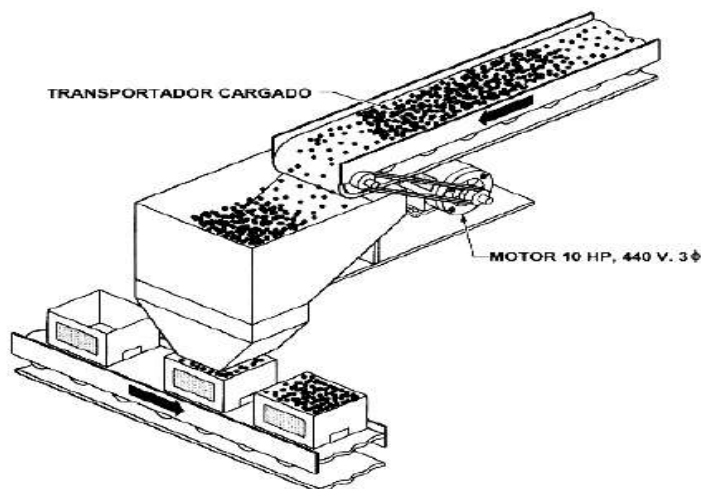


Figura 2.1: Transportador de material pesado.

2.2. Partes del motor eléctrico trifásico

La figura muestra el aspecto exterior de un motor trifásico. Su construcción es similar a la de los motores monofásicos de fase partida, a diferencia de que no están constituidos por un interruptor centrífugo.

Las partes principales de un motor trifásico son: estator, rotor y escudos.

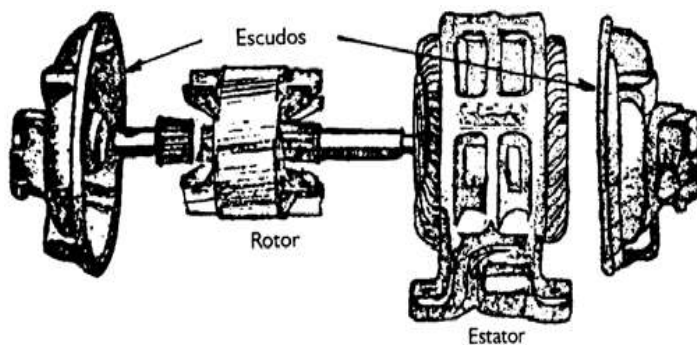


Figura 2.2: Partes del motor eléctrico trifásico.

2.2.1. El estator

Está constituido por un enchapado de hierro al silicio, introducido generalmente a presión, entre una carcasa de hierro colado. El enchapado es ranurado, lo cual sirve para insertar allí las bobinas, que a su vez se construyen con alambre de cobre, de diferentes diámetros [5].

2.2.2. El rotor

Es la parte móvil del motor. Está formado por el eje, el enchapado y unas barras de cobre o aluminio unidas en los extremos con tornillos. A este tipo de rotor se le llama de jaula de ardilla o en cortocircuito porque el anillo y las barras que son de aluminio, forman en realidad una jaula [5].

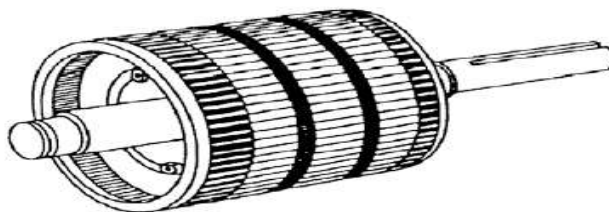


Figura 2.3: Rotor jaula de ardilla.

2.2.3. Los escudos

Están hechos con hierro colado (la mayoría de veces). En el centro tienen cavidades donde se incrustan cojinetes de bolas sobre los cuales descansa el eje del rotor. Los escudos deben estar siempre bien ajustados con respecto al estator, porque de ello depende que el rotor gire libremente, o que tenga “arrastres” o “fricciones” [5].

2.3. Funcionamiento

Cuando la corriente atraviesa los arrollamientos de las tres fases del motor, en el estator se origina un campo magnético que induce corriente en las barras del rotor.

Dicha corriente da origen a un flujo que, al reaccionar con el flujo del campo magnético del estator, originará un par motor que pondrá en movimiento al rotor. Dicho movimiento es continuo, debido a las variaciones también continuas, de la corriente alterna trifásica [5].

Solo debe hacerse notar que el rotor no puede ir a la misma velocidad que la del campo magnético giratorio. Esto se debe a que a cada momento recibe impulsos del campo, pero al cesar el empuje, el rotor se retrasa. A este fenómeno se le llama deslizamiento.

Después de ese momento vendrá un nuevo empuje y un nuevo deslizamiento, y así sucesivamente. De esta manera se comprende que el rotor nunca logre alcanzar la misma velocidad del campo magnético giratorio.

Es por lo cual recibe el nombre de asíncrono o asincrónico. El deslizamiento puede ser mayor conforme aumenta la carga del motor y lógicamente, la velocidad se reduce en una proporción mayor [5].

2.4. Tipos y características del motor eléctrico

Si el rotor tiene la misma velocidad de giro que la del campo magnético rotativo, se dice que el motor es síncrono. Si por el contrario, el rotor tiene una velocidad de giro mayor o menor que dicho campo rotativo, el motor es asíncrono o de inducción [5].

Los motores eléctricos trifásicos están conformados por dos grandes grupos:

- Motores Síncrónicos.
- Motores Asíncrónicos.

2.4.1. Motores síncrónicos

Este motor tiene la característica de que su velocidad de giro es directamente proporcional a la frecuencia de la red de corriente alterna que lo alimenta. Es utilizado en aquellos casos en donde se desea una velocidad constante [5].

Las máquinas síncronas funcionan tanto como generadores y como motores. En nuestro medio sus aplicaciones son mínimas y casi siempre están relacionadas en la generación de energía eléctrica.

Para el caso referente a la máquina rotativa síncrona, todas las centrales Hidroeléctricas y Termoeléctricas funcionan mediante generadores síncronos trifásicos. Para el caso del motor se usa principalmente cuando la potencia demandada es muy elevada, mayor que 1MW (mega vatio) [5].

Los motores síncronos se subdividen a su vez, de acuerdo al tipo del rotor que utilizan, siendo estos: rotor de polos lisos (polos no salientes) y de polos salientes.

2.4.1.1. Motor de rotor de polos lisos

Se utilizan en rotores de dos y cuatro polos. Estos tipos de rotores están contruidos al mismo nivel de la superficie del rotor. Los motores de rotor liso trabajan a elevadas velocidades [5].

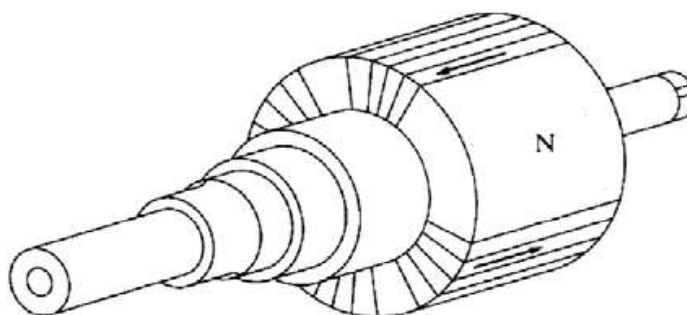


Figura 2.4: Rotor de polos lisos.

2.4.1.2. Motor de rotor de polos salientes

Los motores de polos salientes trabajan a bajas velocidades. Un polo saliente es un polo magnético que se proyecta hacia fuera de la superficie del rotor. Los rotores de polos salientes se utilizan en rotores de cuatro o más polos [5].

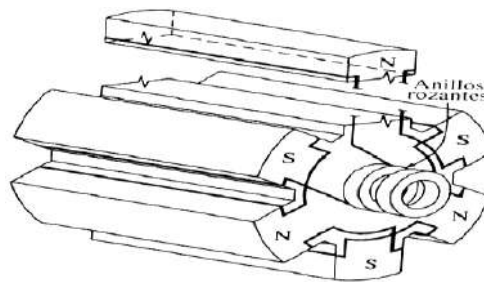


Figura 2.5: Rotor de polos salientes.

2.4.2. Motores asíncronos

Los motores asíncronos o motores de inducción, son las máquinas de impulsión eléctrica más utilizadas, pues son sencillas, seguras y baratas. Los motores asíncronos se clasifican según el tipo de rotor, en motores de rotor en jaula de ardilla (o motores con inducido en cortocircuito) y en motores de rotor bobinado o de anillos rozantes [5].

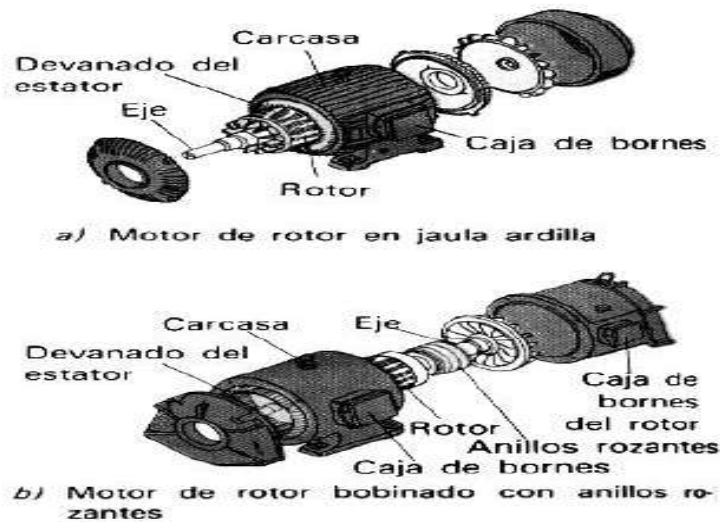


Figura 2.6: Motor de inducción asíncrono.

En los motores asíncronos trifásicos, la energía eléctrica se suministra al bobinado del estator. Como consecuencia de ello, aparece un par aplicado al rotor, y éste girará [5].

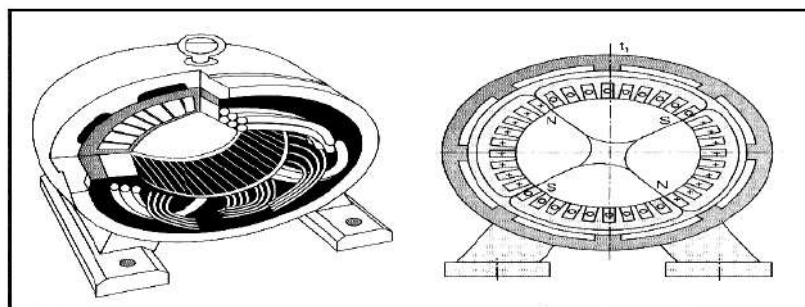


Figura 2.7: Estator de un motor asíncrono.

Sin lugar a dudas, como toda máquina puesta o no en servicio, la temperatura excesiva del ambiente o causada por un problema con el motor mismo, es un elemento clave a considerar, ya que de ella depende la vida útil de la máquina.

2.5. Características del motor eléctrico

Los factores más importantes para la valoración y selección de los motores es el factor de potencia ($\cos \alpha$), el rendimiento η_1 , la intensidad de la corriente I , la tensión V , la frecuencia de giro n , y la potencia P [5].

2.5.1. Frecuencia de giro

En los motores suele indicarse la frecuencia de giro, que es el número de revoluciones del rotor en un tiempo determinado. Es frecuente tomar el tiempo transcurrido como un minuto [5].

$$\text{Frecuencia de giro} = \frac{\text{No.de revoluciones}}{\text{Tiempo Transcurrido}}$$

El símbolo de la frecuencia de giro es “n”.

$$\begin{aligned} \text{Frecuencia } (f) &= \frac{1 \text{ ciclo } (1)}{\text{período } (1)} \\ \text{Frecuencia de giro} &= n \text{ dada en R.P.M.} \\ n &= \frac{60s \times f}{1 \text{ m}} = \text{R.P.M.} \end{aligned}$$

Ecuación 2.1: Frecuencia de giro.

En las máquinas eléctricas se suele indicar la frecuencia de giro n, en R.P.M.

2.5.2. Par

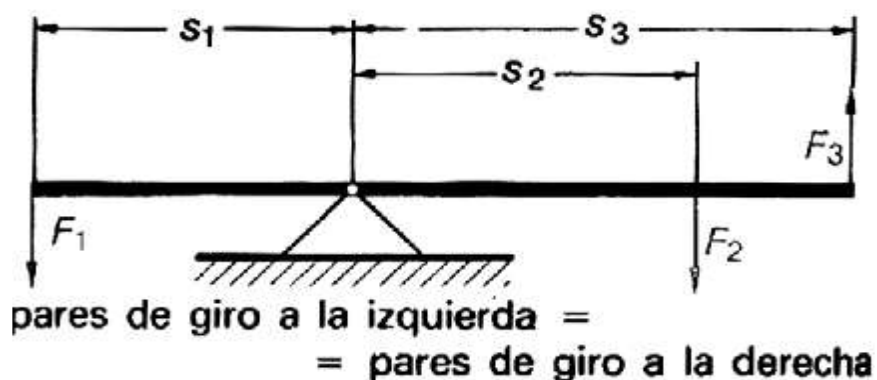
Se genera un momento de giro cuando una fuerza se aplica fuera del centro de giro de un cuerpo. El producto de la fuerza F (medida en Newton) por un radio r (medida en metros) del brazo de palanca se denomina par M de la fuerza [5].

$$M = f \times r$$

$$[M] = N \times m$$

Ecuación 2.2: Ecuación de par.

Cuando los pares de giro a la derecha y los de giro a la izquierda son iguales, la palanca se encuentra en equilibrio, o sea, en reposo. Si los dos pares son diferentes, la palanca girará en el sentido del par mayor. En las máquinas eléctricas rotativas, también se representan por pares.



$$\text{Par } M = F \cdot s$$

Figura 2.8: Ley de la palanca.

En el estator se origina un campo magnético de flujo ϕ . El rotor se compone de un tambor de hierro dulce magnético, con muescas o ranuras en las que se insertan los conductores.

2.5.3. Potencia

La potencia mecánica de los motores se expresa, ya sea en caballos de fuerza (HP) o en Kilowatts. La relación entre estas cantidades está dada por la expresión [5]:

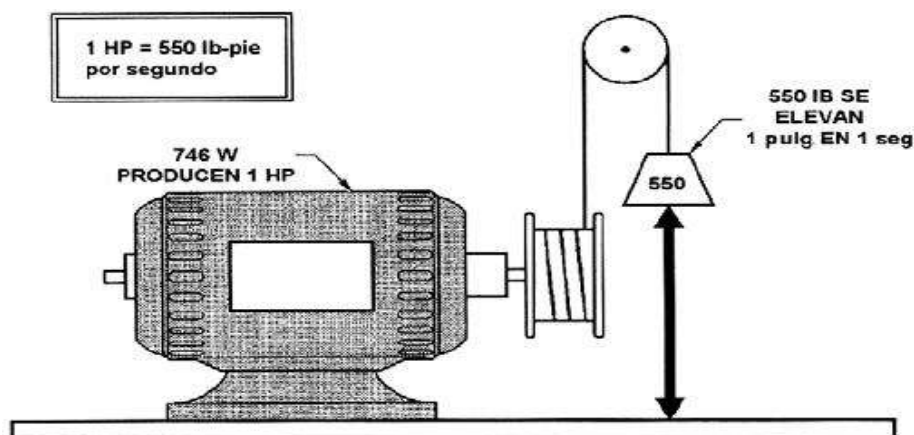


Figura 2.9: La potencia de un motor se da en HP o en watts.

$$\text{HP} = \frac{\text{kilowatts}}{0.746}$$

Ecuación 2.3: Ecuación de potencia en hp.

Estas medidas cuantifican la cantidad de trabajo que un motor es capaz de desarrollar en un periodo específico de tiempo [5].

Dos son los factores importantes que determinan la potencia mecánica de salida en los motores: el par y la velocidad.

Se define la potencia como el cociente del trabajo W (medido en Joule) por el tiempo t (medido en segundos); la ecuación de la potencia es:

$$P = \frac{W}{t}$$

Ecuación 2.4: Ecuación de potencia.

Donde:

P es la potencia, en vatios [W].

W es el trabajo en joules [J].

T es el tiempo que se emplea para efectuar el trabajo, en segundos [s].

Se mide generalmente en Joules por segundo (watts), pero también puede medirse en el sistema inglés en libra pie por segundo (lb p/s) o en caballos de fuerza (HP).

Un caballo de fuerza es la unidad de potencia igual a 746 watts o 3300 lb – pie por minuto o 550 lb – pie por segundo.

2.5.4. Par de polos

Una barra de un imán consta de dos polos: Norte (N) y Sur (S), también puede decirse que la barra de un imán consta de un par de polos [5].

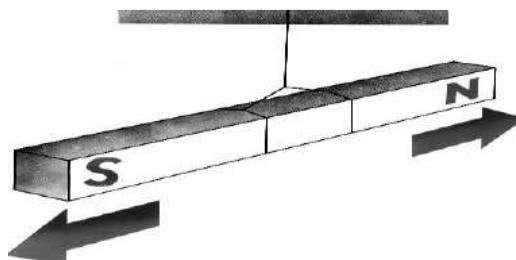


Figura 2.10: Barra imán.

La frecuencia siempre viene registrada en los datos de placa de características del motor, y debido a que la misma depende del número de polos, es relativamente fácil calcular el número de éstos, a partir de la frecuencia.

La ecuación para calcular el número de polos de una máquina rotativa es la siguiente:

$$\text{No. de polos} = \frac{120 \times f}{n}$$

Ecuación 2.5: Numero de polos.

Y para calcular los pares de polos la ecuación es:

$$p = \frac{\text{No. de polos}}{2} = \frac{120 \times f}{2n} = \frac{60f}{2}$$

Ecuación 2.6: Pares de polos.

Donde:

p es el número de pares de polos “no tiene unidades de medida”.

No. de polos (es el número de polos) “no tiene unidades de medida”.

f es la frecuencia eléctrica en Hz.

n es la frecuencia de giro en rad/s.

120 y 60 son constantes.

Por ejemplo: El motor de la figura muestra cuatro polos o dicho de otra forma dos pares de polos.

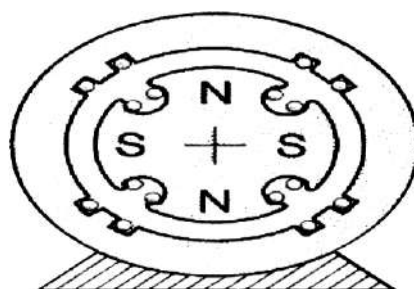


Figura 2.11: Motor con dos pares de polos.

2.5.5. Rendimiento

En la transformación de energía, por ejemplo, en un convertidor, aparecen efectos secundarios que no son intencionados, pero tampoco evitables. Así, la corriente calienta los hilos del devanado; el material del núcleo y los polos se calientan también por magnetización. Además, aparecen rozamientos de cojinetes y corrientes de aire. La cantidad de energía desperdiciada en los efectos secundarios se designa como pérdidas [5].

Solo una parte de la energía primitiva se transforma en la energía deseada; otra parte se transforma en pérdidas de energía, generalmente como calor.

En general, la relación entre utilización y consumo se designa como rendimiento η . Si se compara la potencia de salida (potencia utilizable) con la potencia de entrada (potencia aplicada), el rendimiento o eficiencia es la relación entre potencia de salida y potencia de entrada.

Es importante que ambas potencias deben estar expresadas en las mismas unidades.

η = rendimiento.

Pab = potencia de salida.

Pzn = potencia de entrada.

El rendimiento puede ser dado como un número decimal o en tanto por ciento (%). Como la potencia de salida es siempre menor que la potencia de entrada, el rendimiento es siempre menor que 1 o que el 100%.

CAPÍTULO 3

Tecnología Predictiva por Termografía

3.1. Termografía infrarroja

La termografía es una técnica que permite medir temperaturas a distancia y sin necesidad de contacto físico con el objeto a estudiar. Mediante la captación de la radiación infrarroja del espectro electromagnético. Utilizando cámaras termográficas podremos convertir la energía radiada en información sobre temperatura [6].

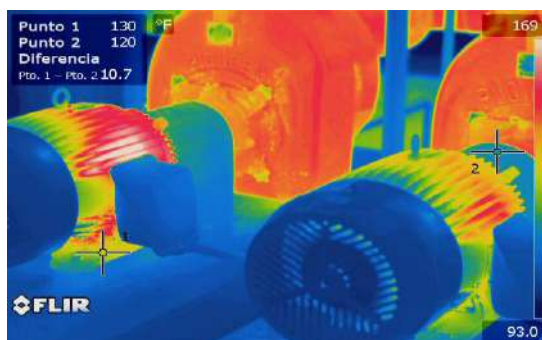


Figura 3.1: Imagen térmica.

3.2. La cámara termográfica

Una cámara termográfica es el dispositivo que va a detectar el patrón térmico del cuerpo al que se apunta, en el espectro de la longitud de onda infrarroja y sin entrar en contacto con ese cuerpo [6].

La energía de infrarrojos (A) que irradia un objeto se enfoca con el sistema óptico (B) sobre un detector de infrarrojos (C). El detector envía los datos al sensor electrónico (D) para procesar la imagen. Y el sensor traduce los datos

en una imagen (E), compatible con el visor y visualizable en un monitor de vídeo estándar o una pantalla LCD.



Figura 3.2: Cámara termográfica.

La termografía de infrarrojos es el arte de transformar una imagen de infrarrojos en una imagen radiométrica que permita leer los valores de temperatura. Por tanto, cada píxel de la imagen radiométrica es, de hecho, una medición de temperatura. Para ello, se incorporan complejos algoritmos a la cámara de infrarrojos. Esto hace de la cámara termográfica una herramienta perfecta para el mantenimiento predictivo [6].

3.3. Que son los infrarrojos

Nuestros ojos son detectores diseñados para detectar la radiación electromagnética en el espectro de luz visible. Cualquier otro tipo de radiación electromagnética, como la infrarroja, es invisible para el ojo humano [7].

El astrónomo Sir Frederick William Herschel descubrió la existencia de la radiación infrarroja en 1800. Su curiosidad por la diferencia térmica entre los distintos colores de la luz le llevó a dirigir la luz solar a través de un prisma de cristal para crear un espectro y, a continuación, midió la temperatura de cada color. Descubrió que dichas temperaturas crecían en progresión desde la parte del violeta hacia la del rojo.

Tras revelar este patrón, Herschel midió la temperatura del punto inmediatamente más allá de la porción roja del espectro, en una región sin luz solar visible. Y, para su sorpresa, halló que esa región era la que mostraba la temperatura más alta [7].

Los infrarrojos están a medio camino entre el espectro visible y las microondas del espectro electromagnético. La fuente principal de radiación de infrarrojos es el calor o la radiación térmica. Cualquier objeto con una temperatura superior al cero absoluto ($-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ o 0 Kelvin) emite radiación en la región infrarroja. Hasta los objetos más fríos que podamos imaginar, como los cubitos de hielo, emiten rayos infrarrojos.

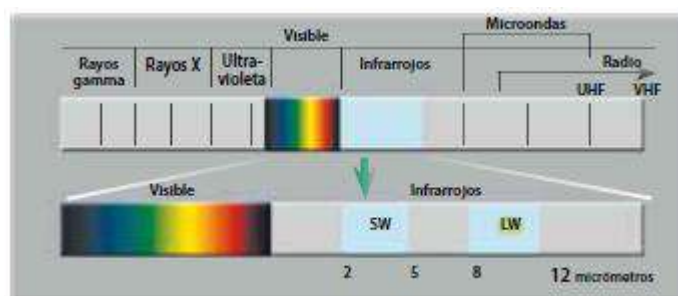


Figura 3.3: Temperatura de colores.

Todos los días estamos expuestos a rayos infrarrojos. El calor de la luz solar, del fuego o de un radiador son formas de infrarrojos. Aunque nuestros ojos no los vean, los nervios de nuestra piel los perciben como calor. Cuanto más caliente es un objeto, más radiación de infrarrojos emite [7].

3.4. Emisión, reflexión y transmisión

La radiación registrada por la cámara termográfica consiste en la radiación de onda larga emitida, reflejada y transmitida que surge de los objetos presentes en el campo de visión de la cámara [8].

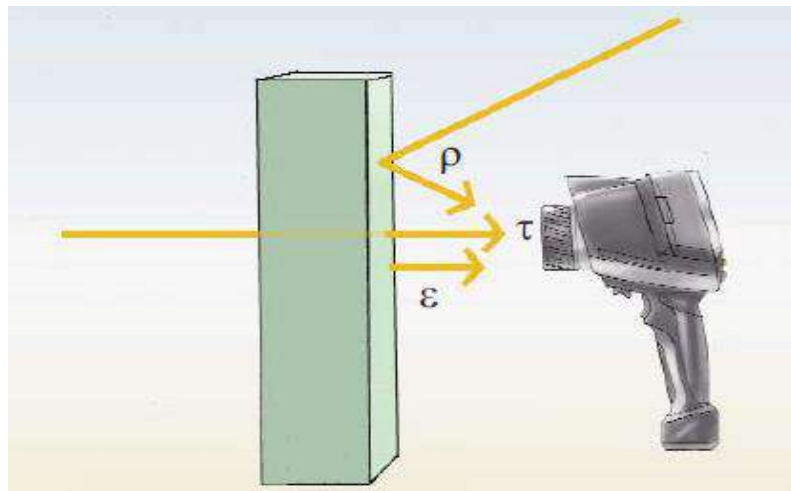


Figura 3.4: Emisión Reflexión y Transmisión.

3.4.1. Emisión

La emisividad (ϵ) es la medida de la capacidad de un material de emitir (propagar) radiación infrarroja [8].

- La ϵ varía según las propiedades de la superficie, el material, y, (para algunos materiales) según la temperatura del objeto medido.
- Emisividad máxima: $\epsilon = 1$ (100%) $\epsilon = 1$, en realidad, nunca se da.
- Cuerpos reales: $\epsilon < 1$, porque los cuerpos reales también reflejan y algunos incluso transmiten radiación.

- Muchos materiales no metálicos (p.ej. PVC, hormigón, sustancias orgánicas) tienen una elevada emisividad en el rango infrarrojo de onda larga que no depende de la temperatura ($\epsilon \approx 0.8$ a 0.95).
- Los metales, sobre todo aquellos con una superficie brillante, tienen una baja emisividad que fluctúa con la temperatura.
- La ϵ se puede configurar manualmente en la cámara.

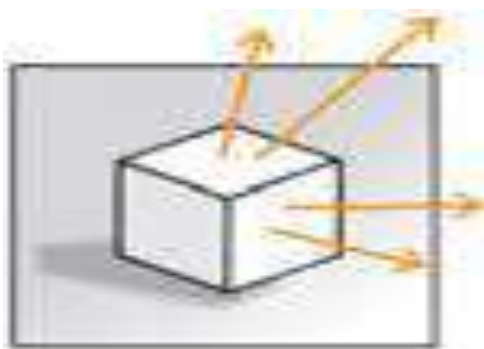


Figura 3.5: Emisión.

3.4.2. Reflexión (ρ)

La reflexión (ρ) es la medida de la capacidad de un objeto de reflejar la radiación infrarroja [8].

- La ρ depende de las propiedades de la superficie, la temperatura y el tipo de material.
- Por lo general, las superficies lisas y pulidas reflejan mucho más que las irregulares y sin pulir del mismo material.
- La temperatura de la radiación reflejada se puede configurar manualmente en la cámara termográfica (RTC).

- En muchas aplicaciones, la RTC se corresponde con la temperatura ambiente.
- El ángulo de reflexión de la radiación infrarroja reflejada es siempre el mismo que el ángulo de incidencia.

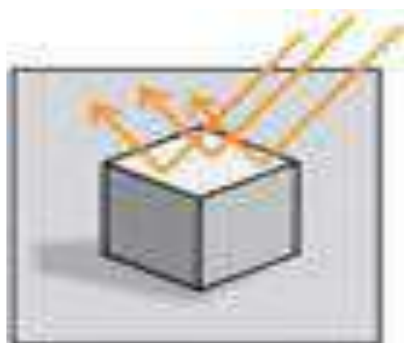


Figura 3.6: Reflexión.

3.4.3. Transmisión (T)

La transmisión (T) es la medida de la capacidad de un material de transmitir (permitir el paso) de la radiación infrarroja [8].

- La T depende del tipo y grosor del material.
- Muchos materiales son no transmisivos, es decir, impermeables a la radiación infrarroja de onda larga.

3.5. Uso de la termografía en mantenimiento predictivo

Las cámaras termográficas para inspecciones de mantenimiento predictivo son potentes herramientas para la supervisión y el diagnóstico de estado de componentes e instalaciones eléctricas y mecánicas. Permite identificar problema en una fase inicial, de forma que se puede documentar y corregir antes de que se agraven y resulten más costosos de reparar [8].

En una instalación industrial se utiliza para hacer inspecciones de sistemas eléctricos de todos los tamaños y formas.

a) Fallos que pueden ser detectados con termografía.

- Conexiones recalentadas.
- Conexiones mal aseguradas.
- Conexiones de alta resistencia.
- Defectos de aislamiento.

b) En instalaciones eléctricas mecánicas.

- Problemas de lubricación.
- Errores de alineación.
- Motores recalentados.
- Rodillos sospechosos.
- Bombas sobrecargadas.
- Ejes de motor recalentados.
- Rodamientos calientes.



Figura 3.7: Distribución de temperatura dentro de un tablero.

3.6. Ventajas de la inspección por termografía

Las ventajas que presenta esta técnica de monitoreo son las siguientes descritas [8]:

- En una inspección termográfica, los problemas saltan a la vista de inmediato.
- Permite supervisar cuadros eléctricos, motores bombos, equipos de alta temperatura, como buscar perdidas de aislamiento.
- Ayuda a detectar anomalías que normalmente son invisibles.
- Alrededor del 35% de los fuegos industriales tienen origen en problemas eléctricos que causan perdidas millonarias. Con el análisis termográfico se pueden evitar muchos de estos problemas.
- Proporcionan una imagen completa de la situación.
- Permiten llevar a cabo inspecciones mientras los sistemas están en funcionamiento.
- Identifican y encuentran el problema.
- Miden temperaturas.
- Guardan información.
- Indican exactamente qué se necesita corregir.
- Ayudan a encontrar fallos antes de que se produzcan problemas reales.
- Permiten ahorrar valioso tiempo y dinero.

3.7. Proceso de inspección y condiciones a tener en cuenta

Capturar la imagen, guardarla en la tarjeta de memoria de la cámara y posteriormente usarla para trabajar en el informe termográfico es el proceso habitual de trabajo del termógrafo [6].

Lógicamente sin capturar la imagen no hay nada que hacer. Se podrá ver el problema, solucionarlo o no, avisar, pero no habrá constancia de ello. Si se toma la imagen, pero no se guarda o no se encuentra la carpeta en donde está, se tiene el mismo problema.

Y, por último, si no nos paramos a pensar, delante del ordenador y con el software de análisis de las imágenes térmicas, es probable que se pase por alto algún detalle que pueda ser de vital importancia para el informe.

Existen cuatro grandes reglas para capturar una imagen, no se deben olvidar pues nunca se podrá modificar una imagen si se ha cometido un error en alguno de estos tres puntos:

3.7.1. Encuadre de la imagen

En el fondo se es casi fotógrafo, pero no creativo, es decir, si se quiere medir un objeto, lo presentaremos bien visible y en la posición que dé más información. ¡Acercándose todo lo que se pueda!, manteniendo una distancia segura [6].

3.7.2. Enfoque

Una imagen desenfocada dará medidas erróneas y, además, hablará muy mal del termógrafo. Por supuesto se debe tratar de mantener la pantalla en todo momento limpia.

3.7.3. Ajuste del rango de temperatura

Se debe fijar el rango de medida que incluya lo que se pretende medir. Si se fija un rango muy ancho, se tendrá menos precisión en la medida. Es como si se quieren medir milivoltios fijando el rango en kilovoltios [6].

3.7.4. Cuidado con las condiciones meteorológicas

La temperatura exterior, cambiante, y la hora a la que se realiza la inspección termográfica pueden hacer que esta y sus resultados varíen de un día a otro, por lo que elegir el momento adecuado para hacer el trabajo es un factor a tener en cuenta. Obviamente esto no tiene sentido si la inspección es interior y el ambiente no afecta [6].

Si se olvida alguno de estos puntos, tocara volver al lugar de la inspección a realizar de nuevo el trabajo, con todo lo que ello conlleva de sobrecosto para el informe.

3.7.5. El entorno del objeto

Es evidente que, durante la inspección el termógrafo se encontrara en un entorno cambiante que va a influir en la imagen que pueda obtener, incluso como la va a obtener. Como poco, entre el cuerpo que se quiere medir y la cámara, existirá cierta cantidad de aire. En segundo lugar, salvo que se trabaje en un laboratorio ensayando con materiales, lo habitual es que el objeto que se mide este rodeado de otros objetos que no interesan pero que emitirán radiación hacia él y este la reflejara hacia la cámara. A partir de ahí, todo lo que se quiera añadir es posible que lo encontremos en alguna ocasión [6].

Toda medida de un objeto ha de comenzar necesariamente por una medida o estimación de la temperatura aparente reflejada, la temperatura del entorno.

3.7.6. La atmosfera

La radiación que llega a la cámara procedente del objeto, no es igual a 1. Existe una pequeña parte que será absorbida por la atmosfera, y además

variable en función de la cantidad de aire que exista entre el cuerpo y la cámara (la distancia) y las condiciones de la atmosfera (partículas en suspensión) [6].

Se puede y se debe considerar la atmosfera como un cuerpo más que transmitirá la radiación emitida por el cuerpo (la mayor parte) y absorberá una pequeña parte de esa radiación.

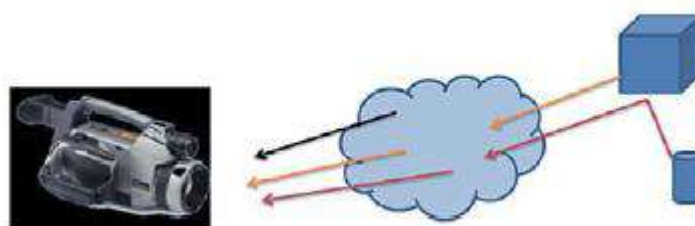


Figura 3.8: Emisión y reflejo de radiaciones.

En la figura se ve como el cuerpo con forma de cubo emite una radiación propia y refleja otra procedente del cilindro, y estas llegan al detector con una ligera variación tras atravesar la atmosfera y además, junto con la radiación que emite la propia atmosfera, por pequeña que esta pueda ser [6].

Por tanto, la tarea ahora es compensar estas dos variables que influyen en la medida, la atmosfera y la radiación reflejada.

3.7.7. Compensación de ambos efectos

Para compensar el primero, la influencia de la atmosfera, se plantean las siguientes preguntas, ¿Cuánta atmosfera hay entre el objeto y la cámara? y ¿Qué densidad tiene? O dicho de otra manera más sencilla, ¿a qué distancia se está del cuerpo y cuál es la temperatura exterior y la humedad relativa del aire? [6].

En cuanto a la distancia, está claro que cuando más se aleja del cuerpo, más atmosfera existirá entre este y la cámara y por tanto más atenuación de la radiación (además de otras consideraciones como que el objeto será más pequeño).

Respecto a la temperatura del aire, si es muy elevada, más irradiación se producirá.

Por último, en cuanto a la humedad, la atmosfera tiene moléculas de vapor de agua (H₂Og) en suspensión, cuanta más moléculas tenga la atmosfera, más dificultad tendrá la radiación en llegar a la cámara.

Estos tres valores pueden ajustarse en las cámaras termográficas en los ya conocidos parámetros de objeto, se puede probar a hacerlo y comparar su influencia en las medidas obtenidas. El resultado será que apenas hay variación, ¿verdad? Sin embargo, conviene esos datos ya que, si se realiza un informe mediante el software del fabricante, aparecerán esos datos por defecto y el cliente pensara que son reales o pensara que no son correctos bien por error o por cualquier motivo menos que es porque no influyen apenas en la medida.

En cualquier caso, si no se está seguro de los valores, los siguientes pueden ser recomendables y suelen aparecer por defecto en algunas cámaras.

- Distancia al objeto 1,0 m
- Emisibilidad 0,95
- Humedad relativa 50%
- Temperatura aparente reflejada +20 C

- Temperatura atmosférica +20 C

Para compensar el segundo efecto, el del entorno o la temperatura aparente reflejada (Trefl), existe varias formas. Antes hay que recordar que Trefl no es lo mismo que temperatura ambiente, esto es importante porque lo que se ha de compensar es la Trefl, que influye bastante más que la Tamb. Esto es importante recordarlo a la hora de introducir los datos en la cámara, además es posible que en cada equipo se denominen de otra manera [6].

3.8. Conclusiones a partir de la imagen térmica

Como termógrafo, se dispone de una sola herramienta de trabajo, la cámara y con las imágenes obtenidas se realiza los informes y se sacaran las conclusiones. Pero esto no es apuntar y disparar, no se trabaja en el visual sino en el infrarrojo, y esto tiene grandes diferencias que llevan a tener que entrenar al cerebro a interpretar las imágenes térmicas [6].

Existen dos métodos de análisis de las imágenes térmicas, los análisis cualitativos y los cuantitativos.

3.8.1. Análisis cualitativo

La imagen térmica es analizada para poner de manifiesto anomalías de distinta magnitud, localizarlas y evaluar el nivel de gravedad. Es el primer análisis que hace el termógrafo, aunque se quiera hacer otro tipo de análisis, cuantitativo, inevitablemente al comienzo se tratara de rápidamente buscar aquello que en nuestra cabeza no encaja o se ve que aleja de lo normal para el objeto bajo estudio [6].

El 90% de las inspecciones serán de este tipo, lo cual no quiere decir que sea ni más sencillo ni más complejo, simplemente es un tipo de análisis.

Es habitual que las empresas que realizan inspecciones termográficas tengan definidos unos niveles de gravedad, por ejemplo:

- Grado 1: reparación urgente.
- Grado 2: programar reparación.
- Grado 3: revisar en la siguiente inspección.

3.8.2. Análisis cuantitativo

Determina la temperatura o temperaturas de las partes de la imagen térmica que interesan para, a partir de estas, extraer las conclusiones sobre las anomalías detectadas y las soluciones a adoptar [6].

3.9. Errores del termógrafo

No hay que caer en el error de pensar que la termografía consiste en encender una cámara, apuntar y dispara. Se debe saber manejar conceptos de transferencia de calor, materiales y sus propiedades, la atmosfera y su influencia y un sinfín de variables que afectan el trabajo [6].

3.9.1. La cámara y su uso

No todas las cámaras termográficas son válidas para todas las tareas. El detector infrarrojo de la cámara es sensible a una determinada franja del espectro electromagnético, incluso dentro del infrarrojo, lo cual afectara al cuerpo que se esté midiendo. Existen dos tipos de cámaras, de onda larga y de onda corta, en función de las necesidades, se adquirirá un equipo y otro [6].

3.9.2. Resolución y óptica

En esto influye el diseño del detector, el número de pixeles que genera la imagen y la calidad de la óptica y su fabricación y montaje. El mercado de la posibilidad de cambiar ópticas sin cambiar la cámara, como un fotógrafo que cambia de objetivo si va a hacer un retrato, tomar un paisaje, etc. Seleccionar bien estas características, antes de adquirir el equipo, es fundamental [6].

3.9.3. Toma de la imagen

El ángulo con que se toma la imagen, el enfoque, la posición respecto al objeto, los reflejos, etc., son fundamentales para el diagnóstico. Incluso tomar varias imágenes desde distintos ángulos ayudara a diagnosticar el problema. Una vez que se abandone el lugar de la inspección, quizá no se vuelva o se haga ya con el informe definitivo en la mano [6].

Si la inspección abarca bastantes elementos muy parecidos entre sí, hay que identificarlos bien y no olvidar tomar las imágenes visuales de los mismos.

3.9.4. Punto frio y punto caliente

Las anomalías no tienen por qué conllevar una temperatura alta, no siempre hay que buscar el punto caliente. No siempre los colores identifican el problema, la imagen hay que analizarla en conjunto [6].

3.9.5. El enfoque

Toda la información que se saque de la imagen analizada, formara parte del informe. No hay que precipitarse a la hora de escribir las impresiones. Hay que dejar claro el alcance del informe y no retrasarse más de 3 o 4 días en la elaboración del mismo (dependiendo también del alcance de la inspección).

Si el trabajo de campo ha consistido en averiguar por qué una bomba circuladora de agua se calienta y tardamos en elaborar el informe con las conclusiones más de una semana, es probable que cuando se entregue ya este la bomba quemada y el circuito parado [6].

CAPÍTULO 4

Tecnología Predictiva por Vibraciones

4.1. Vibraciones

En términos muy simples una vibración es un movimiento oscilatorio de pequeña amplitud. Todos los cuerpos presentan una señal de vibración en la cual plasman cada una de sus características.

De acuerdo a esto, las máquinas presentan su propia señal de vibración y en ella se encuentra la información de cada uno de sus componentes. Por tanto, una señal de vibración capturada de una máquina significa la suma vectorial de la vibración de cada uno de sus componentes [9].

4.2. Característica de las señales de vibraciones dinámicas

Las informaciones de los procesos industriales y de los experimentos de ingeniería son transmitidas por señales dinámicas. Algunas veces, estas señales son del tipo “dc” que llevan la información completa de valor medio y de variación rápida en el tiempo. En otras ocasiones, las señales son del tipo “ac” que muestran solo las variaciones consideradas rápidas [10].

Independientemente de la forma de las señales portadoras de la información de interés, es importante analizarlas con el mayor cuidado, pues la calidad de la interpretación descansa directamente sobre el Análisis de Señal.

Es entonces necesario conocer las distintas formas en que las señales se presentan, como las mismas se combinan dinámicamente para, a partir de allí, escoger las técnicas más apropiadas de análisis de señales. Actualmente se

dispone de numerosos instrumentos analizadores de señales, con recursos computacionales muy potentes y de precios relativamente pequeños.

En las siguientes secciones se presentan los principales modos en que se combinan las señales, tratando de facilitar su comprensión y permitir así escoger los analizadores de señales más adecuados.

4.2.1. Señales Armónicas

Las señales armónicas representan perfectamente la mayoría de las señales de una máquina. Cada componente de una vibración es esencialmente un movimiento armónico, una senoidal como se muestra en la figura y que se expresa matemáticamente como [10]:

$$x(t) = X \cdot \text{sen}(\omega t)$$

Ecuación 4.1: Ecuación de señal armónica.

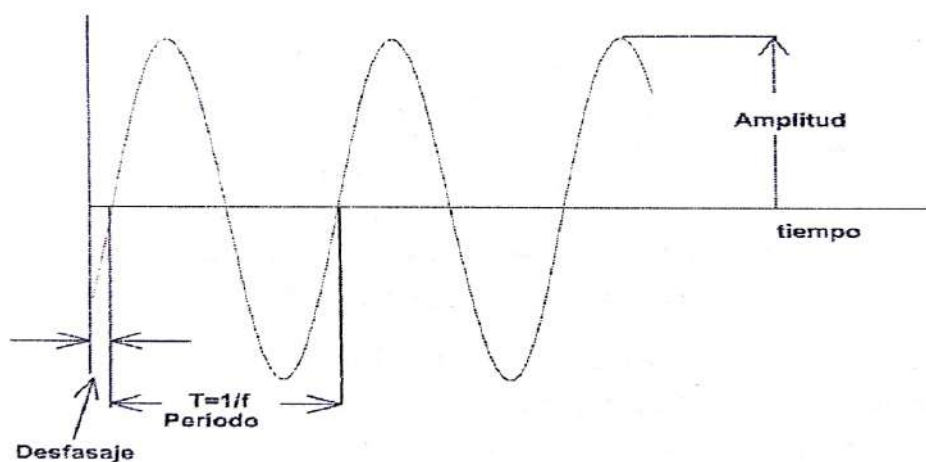


Figura 4.1: Representación temporal del movimiento armónico e indicación de los parámetros relevantes.

Un movimiento armónico tiene parámetros propios que lo caracterizan y que aparecen indicados en la figura ellos son:

Amplitud: valor medio desde el nivel cero hasta el pico de la señal.

Frecuencia: número de veces que un ciclo se repite en la unidad de tiempo. Se expresa en Hertz (Hz) es decir ciclos/ segundos o por la frecuencia "circular" ω que se expresa en radianes por segundos (rad/seg). La relación entre ambas es: $\omega = 2. \pi. f.$

Periodo: tiempo transcurrido en la ejecución de un ciclo completo del movimiento, que se expresa en segundos (s). Queda definido como la inversa de la frecuencia en Hz como: $T = 1/f$ segundos.

Desfasaje: cantidad que se expresa generalmente en grados y que indica el avance o retraso de una onda en relación a otra señal cualquiera. La respuesta de vibración de una maquina esta siempre atrasada con respecto a la excitación.

Un movimiento armónico puede ser representado vectorialmente, en la forma de un vector giratorio (llamado fador) en el plano complejo. Esta forma de representación facilita la comprensión de muchos casos de vibraciones de máquinas, principalmente si fuese necesario combinar excitaciones y/o movimientos. La respuesta del sistema está dada por la componente real del fador ($\text{Re}(z)$) [10].

Matemáticamente, el fador se expresa como:

$$Z = A. e^{j\theta} = A. \cos\theta + jA. \text{sen}\theta$$

Ecuación 4.2: Expresión fasorial de desplazamiento.

siendo $\theta = \omega \cdot t$

Al asociar los movimientos armónicos con la vibración mecánica, es usual referirse al desplazamiento vibratorio como un seno de amplitud X y de frecuencia ω . De este modo, la velocidad de vibración y su aceleración pueden obtenerse derivando la expresión del desplazamiento respecto al tiempo. Se tiene entonces:

desplazamiento $x(t) = X \cdot \text{sen}(\omega t)$

velocidad $v(t) = X \cdot \omega \cdot \text{sen}(\omega t + 90^\circ)$

aceleración $a(t) = X \cdot \omega^2 \cdot \text{sen}(\omega t + 180^\circ)$

Ecuación 4.3: Ecuación de desplazamiento, velocidad, aceleración.

Es importante notar que los tres parámetros tienen la misma frecuencia, la misma forma de variaciones en el tiempo, están desfasados 90° entre sí y tienen sus amplitudes relacionadas por la frecuencia ω (siempre en radianes por segundo).

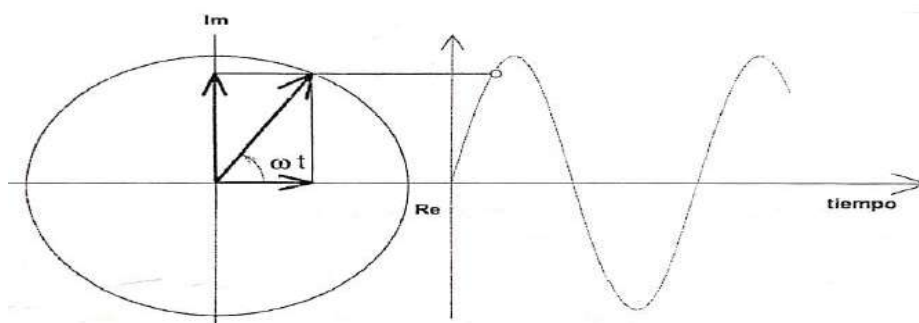


Figura 4.2: Representación vectorial del movimiento armónico.

Los movimientos armónicos de la misma especie que ocurren simultáneamente pueden llegar a mezclarse entre sí y combinarse formando un movimiento armónico único.

Son varias las formas de combinarse de los movimientos armónicos. Si la combinación es por proceso de suma, puede ocurrir uno de los tres casos siguientes:

1. la suma de dos movimientos armónicos de igual frecuencia resulta en otra armónica de la misma frecuencia, pero con otra fase y con amplitud propia. Para demostrar este hecho, consideramos las dos armónicas siguientes:

$$x_1(t) = X_1 \cdot \text{sen}(\omega t)$$

$$x_2(t) = X_2 \cdot \text{sen}(\omega t + \psi)$$

Ecuación 4.4: Armónicas.

La armónica resultante se calcula usando la regla del paralelogramo, o sea:

$$x(t) = X \cdot \text{sen}(\omega t + \psi_0)$$

Ecuación 4.5: Suma de dos movimientos armónicos.

donde:

$$X = \sqrt{[X_1^2 + X_2^2 + 2 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot \cos\psi]}$$

y

$$\psi_0 = \arctan \frac{X_2 \cdot \text{sen}\psi}{X_1 + X_2 \cdot \cos\psi}$$

2. la suma de dos movimientos armónicos de frecuencias diferentes resulta en un movimiento periódico, pero no armónico.
3. la suma de dos movimientos armónicos de frecuencias casi iguales es un caso especial, llamado Batido, que ocurre comúnmente.

Consideremos las dos armónicas siguientes:

$$x_1(t) = X_1 \cdot \text{sen}(\omega t) \quad \text{y} \quad x_2(t) = X_2 \cdot \text{sen}(\omega + \varepsilon) \cdot t$$

con $\varepsilon \ll \omega$

La regla del paralelogramo se aplica de la misma manera que en el caso anterior, pero el desfase es (εt) que es variable en el tiempo. Entonces la resultante es:

$$x(t) = X \cdot \text{sen}(\omega t + \psi)$$

Ecuación 4.6: Suma de dos movimientos armónicos de frecuencias casi iguales.

donde

$$X = \sqrt{[X_1^2 + X_2^2 + 2 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot \cos(\varepsilon \cdot t)]}$$

y

$$\psi = \arctan \frac{X_2 \cdot \text{sen}(\varepsilon \cdot t)}{X_1 + X_2 \cdot \cos(\varepsilon \cdot t)}$$

Nótese que tanto la expresión de la amplitud como la de la fase tienen variaciones armónicas en el tiempo con frecuencia ε (que es la diferencia entre las frecuencias de las dos componentes). La resultante tiene una

frecuencia ω y su amplitud esta modulado por una armónica de frecuencia e . Si la amplitud X_1 y X_2 fuesen iguales se tiene una modulación 100% (la amplitud varía desde $2X_1$ hasta cero).

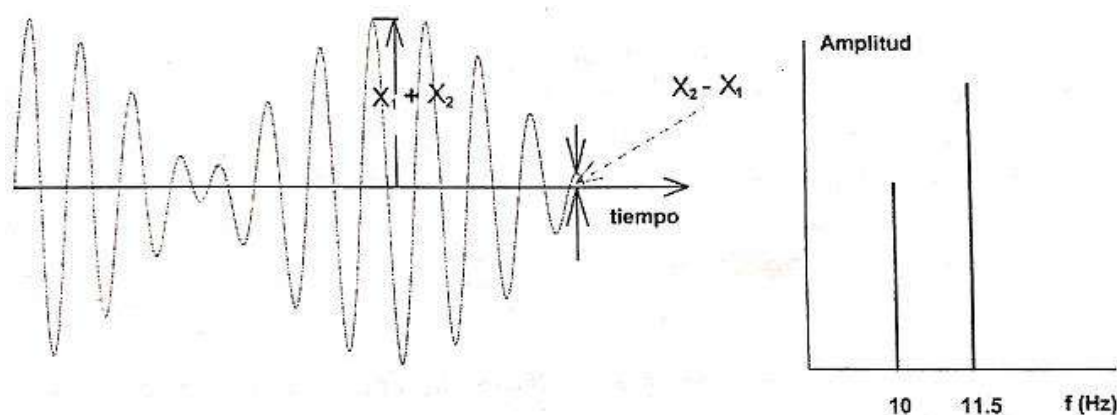


Figura 4.3: Representación gráfica de un batido.

4.2.2. Análisis armónico - Análisis de Fourier

Cuando se miden vibraciones mecánicas o cualquier otra señal de algún sistema dinámico, es difícil encontrar señales armónicas puras. Esto se debe al hecho de que nunca existe solo una única fuente de excitación en ese sistema y la respuesta que se mide es entonces, una composición de respuestas individuales. Por lo tanto, las señales son complejas, ricas en componentes y difíciles de analizar [10].

Para realizar un buen análisis es necesario descomponer las señales compuestas en señales simples, para estar entonces en condiciones de identificar las excitaciones correspondientes. Este es un requisito primordial para posibilitar el mantenimiento predictivo.

Para posibilitar una separación de la señal en componentes de frecuencia se puede usar un filtro analógico de banda de porcentaje constante que ejecuta un barrido secuencial. Mas modernamente, es corriente de uso de analizadores digitales basados en micro procesadores que ejecutan un algoritmo matemático rapidísimo de descomposición armónica: la transformada rápida de Fourier (Fast Fourier Transform).

La expresión matemática de la transformada de Fourier es:

$$X(f) = \int x(t) \cdot e^{-j2\pi ft} dt$$

Ecuación 4.7: Transformada de Fourier.

Los analizadores digitales de espectro, el BK 2515 por ejemplo, son instrumentos de laboratorio o portátiles. Actualmente están muy difundidos y poseen una gran capacidad de análisis. Son prácticamente indispensables en la obtención de diagnósticos rápidos y precisos.

Sus precios en la actualidad son de tal orden que en pocos meses de servicio se pagan a sí mismos (una industria papelera del estado de Paraná, en Brasil, tuvo un retorno total de la inversión en apenas 45 días) [10].

Aplicando el movimiento armónico $x(t)$ en la ecuación (4.7), el resultado de la ecuación de FOURIER ya proporciona la señal separada en sus componentes básicas. La fig.4.4 muestra una señal compleja y su espectro FFT.

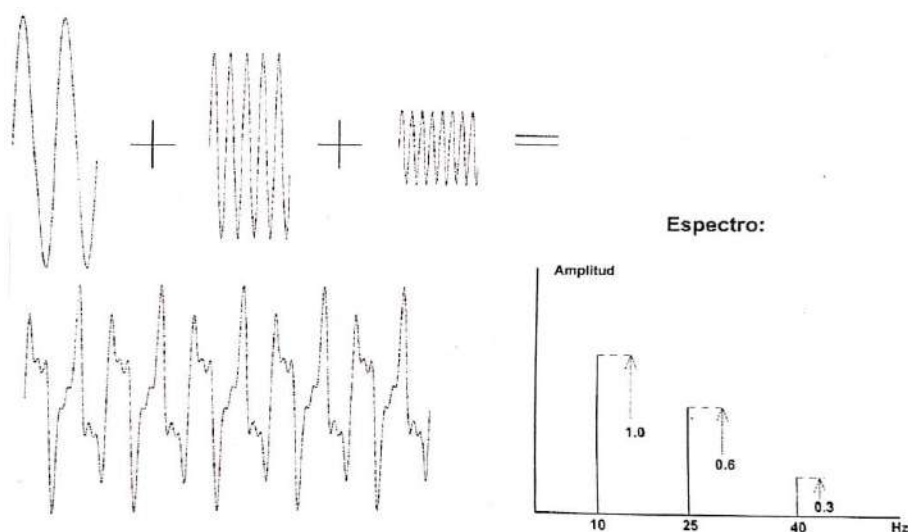


Figura 4.4: Representación de una señal compleja, sus componentes y su espectro.

4.2.3. Modulación de señales

Siempre que varias señales dinámicas ocurren simultáneamente es posible que algunas de ellas se combinen generando otra dinámica de la señal. En cualquier tipo de análisis donde sea requerido interpretar señales dinámicas, el análisis precisa reconocer los diversos tipos de señales y asociarlos a las causas que las generan. Para conseguir eficacia en el análisis de señales es preciso conocer las formas más usuales en que se combinan las señales [10].

En el universo de las señales dinámicas, muchas de ellas apenas se mezclan y entonces son fácilmente separadas por filtros analógicos de banda angosta o por filtrado digital, a través de recursos matemáticos tales como los que se usan en los analizadores digitales de espectro. Algunas veces, el proceso físico que genera las señales, favorece formas especiales de interacción y combinación de componentes, entonces surgen las diversas

formas de modulación. Son muchos los casos en que los procesos físicos generan señales moduladas. Ejemplos de estos son: ruidos acústicos, rotaciones de ejes, engranes, campos magnéticos, etc.

Las formas más comunes de modulación son las conocidas AM (amplitud modulada) y FM (frecuencia modulada) y la modulación de fase. Estas modulaciones son tratadas en profundidad en la bibliografía específica de telecomunicaciones o procesamiento de señales, pues los procesos de modulación son exactamente análogos y valen los mismos principios teóricos.

El analista de vibraciones mecánicas de mantenimiento predictivo mecánico o eléctrico debe conocer algunos fundamentos de modulación para poder identificarlas y asociarlas con las excitaciones correspondientes.

La modulación está compuesta de una señal moduladora. La señal portadora es su propagación “transporta” a la señal moduladora. La señal moduladora modifica a la portadora alterándole o la amplitud, o la frecuencia o la fase.

La modulación en amplitud (AM) consiste en multiplicar la portadora por la señal moduladora. Consideremos que la portadora sea una armónica de frecuencia ω_p y que este modulada por la señal $f(t)$ así se tiene:

$$f(t) \cdot \cos(\omega t)$$

Ecuación 4.8: Señal.

Si se tomase la transformada de Fourier-ecuación (4.7) de la función (4.8), y considerando la ecuación de Euler $e^{\pm j\omega t} = \cos\omega t \pm j \cdot \text{sen}\omega t$, podemos escribir:

$$\cos\omega_p \cdot t = \frac{1}{2} \cdot [e^{j\omega_p t} + e^{-j\omega_p t}].$$

y de allí

$$f(t)\cos\omega_p \cdot t = [f(t) \cdot e^{j\omega_p t} + f(t) \cdot e^{-j\omega_p t}]$$

Que al agrupar los exponentes queda:

$$F[f(t)\cos\omega_p \cdot t] = \frac{1}{2} \cdot [f(t) \cdot e^{j\omega_p t} \cdot e^{j\omega t} \cdot dt + f(t) \cdot e^{-j\omega_p t} \cdot e^{j\omega t} \cdot dt]$$

$$F[f(t)\cos\omega_p \cdot t] = \frac{1}{2} \cdot \left[\int f(t) \cdot e^{-j(\omega_p - \omega)t} \cdot dt + \int f(t) \cdot e^{-j(\omega_p + \omega)t} \cdot dt \right]$$

O escribiendo en la forma más simplificada, el espectro de frecuencias es:

$$F[f(t)\cos\omega_p \cdot t] = \frac{1}{2} \cdot [F(\omega_p - \omega) + F(\omega_p + \omega)]$$

Ecuación 4.9: Espectro de frecuencia.

Esta forma de modulación genera dos componentes de frecuencias equivalentes de la frecuencia de la señal moduladora separadas por $\pm\omega_p$. Nótese que en esta forma de modulación no aparece la portadora en el espectro resultante lo que justifica el nombre de Modulación de Amplitud con Portadora Suprimida [10].

En otra forma de modulación de amplitud, el proceso físico hace que las señales se asocien por un proceso de suma de forma que pueden escribirse como:

$$X_{AM}(t) = f(t) \cdot \cos\omega_p \cdot t + A_p \cdot \cos\omega_p \cdot t$$

Que puede reescribirse como:

$$X_{AM}(t) = [f(t) + A_p] \cdot \cos\omega_p \cdot t$$

Ecuación 4.10: Modulación de amplitud.

Si la amplitud de la portadora fuese siempre mayor que el mayor pico de $f(t)$, la modulación transportara la señal moduladora sin perder ninguna información. El espectro de frecuencias de este tipo de AM contiene un pico en la frecuencia de la portadora con bandas laterales espaciadas de la/s frecuencia/s de la señal moduladora conforme a lo que se muestra en la figura. Aparecen un par de bandas laterales por cada componente de frecuencia de la señal transportada.

Este tipo de AM tiene amplitud variable en función de la señal y su frecuencia es constante. Su aspecto en el tiempo es similar a un batido.

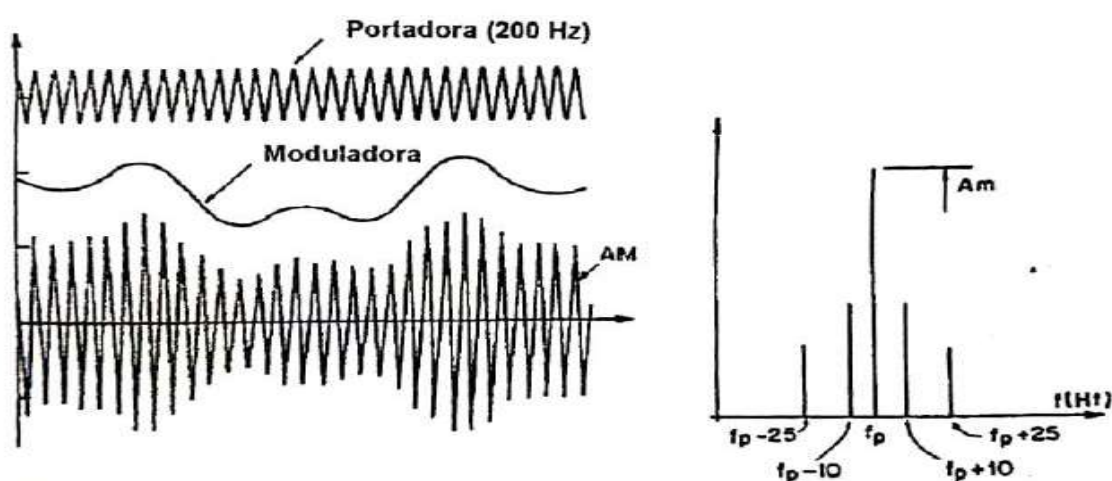


Figura 4.5: Espectro de frecuencia de una señal AM con portadora.

4.2.4. Modulación en frecuencia

En este caso la señal producida por la vibración en alta frecuencia (onda portadora) tiene su frecuencia que varía conforme a otra señal de menor frecuencia, denominada onda moduladora [10].

Generalmente, este tipo de señal puede ser representada por:

$$x(t) = A_p \cdot \cos\left(\omega_p \cdot t + A_M \frac{\omega_p}{\omega_M} \cdot \text{sen}\omega_M \cdot t\right)$$

Ecuación 4.11: Onda modulada.

donde:

ω_p y A_p = frecuencia y amplitud de la portadora.

ω_M y A_M = frecuencia y amplitud de la moduladora.

y si consideramos el caso $\omega_p \gg \omega_M$, se define el factor de modulación como:

$$\beta = A_M \frac{\omega_p}{\omega_M}$$

Ecuación 4.12: Factor de modulación.

y sustituyendo la ec. (4.12) en la (4.11), se tiene:

$$x(t) = A_p \cdot \cos(\omega_p \cdot t + \beta \cdot \text{sen}\omega_M \cdot t)$$

y desarrollando el coseno de la suma:

$$x(t) = A_p \cdot [\cos\omega_p \cdot \cos(\beta \cdot \text{sen}\omega_M \cdot t) - \text{sen}\omega_p \cdot \text{sen}(\beta \cdot \text{sen}\omega_M \cdot t)]$$

Ecuación 4.15: Señal temporal de ecuación.

La señal temporal de la vibración de la ec. (4.15), tiene las siguientes características:

- a. amplitud constante e idéntica a la de la portada.
- b. frecuencia instantánea variable.

Para obtener el espectro de frecuencia de la señal modulada [(ec.4.15)], es necesario usar series continuas de senos y cosenos, en este caso series de Bessel. Otra alternativa es discretizar la señal $x(t)$ y aplicar la Transformada Rápida de Fourier, siendo la precisión tanto mayor cuanto menor sea el intervalo de tiempo de discretización de $x(t)$. Este proceso es utilizado por los programas comerciales para micro computadoras.

En cualquiera de los dos procesos, Bessel o FFT, encontramos un espectro con las siguientes características:

- 1- aparecen infinitas bandas laterales centradas en la frecuencia de la portadora.
- 2- la modulación en frecuencia no es lineal, por lo tanto, no vale el principio de superposición, dificultando el análisis de señales moduladas por espectros complicados.
- 3- la no linealidad de la frecuencia modulada puede generar un número muy grande de bandas laterales.
- 4- dependiendo del valor del índice de modulación β , la amplitud del espectro de frecuencias puede inclusive ser nula.

Muchas veces en la práctica, es difícil distinguir un espectro de FM de otro de AM.

4.2.4.1. Casos comunes de FM en máquinas rotativas

4.2.4.1.1. En engranajes

ω_p = frecuencia de engrane = número de dientes del engranaje multiplicados por la velocidad de su rotación. Alta frecuencia.

ω_M = rotación del engranaje. Baja frecuencia.

Se tiene: $(\omega_p - i\omega_M)$, con $i = 1,2,3,\dots$ bandas en torno de ω_p .

4.2.4.1.2. En motores eléctricos

ω_p = puede ser 1x R.P.M. del motor, o 1x frec red eléctrica, o 2x frec red eléctrica. Alta frecuencia.

ω_M = generalmente es la frecuencia de resbalamiento eléctrico del motor. Baja frecuencia.

Se tiene: $(\omega_p - i\omega_M)$, con $i = 1,2,3$, bandas en torno de ω_p . Así se tiene las frecuencias: $(\omega_p \pm k \cdot \omega_M)$ con $k = 1,2,3$, y las bandas laterales están centradas en ω_p . Ver la fig.4.6.

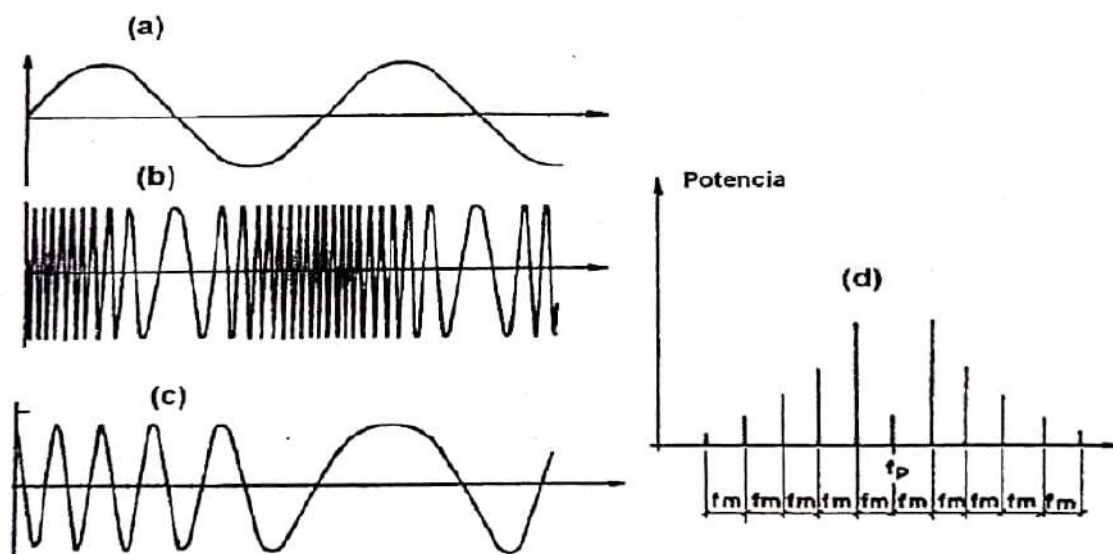


Figura 4.6: Espectro de frecuencia de una señal FM (a) y (b) Señal en el tiempo (c) Zoom en el tiempo, (d) espectro.

Para comparación, la fig.4.7 muestra casos de batido, AM y FM tanto para la variación temporal de las señales y sus respectivos espectros de frecuencias.

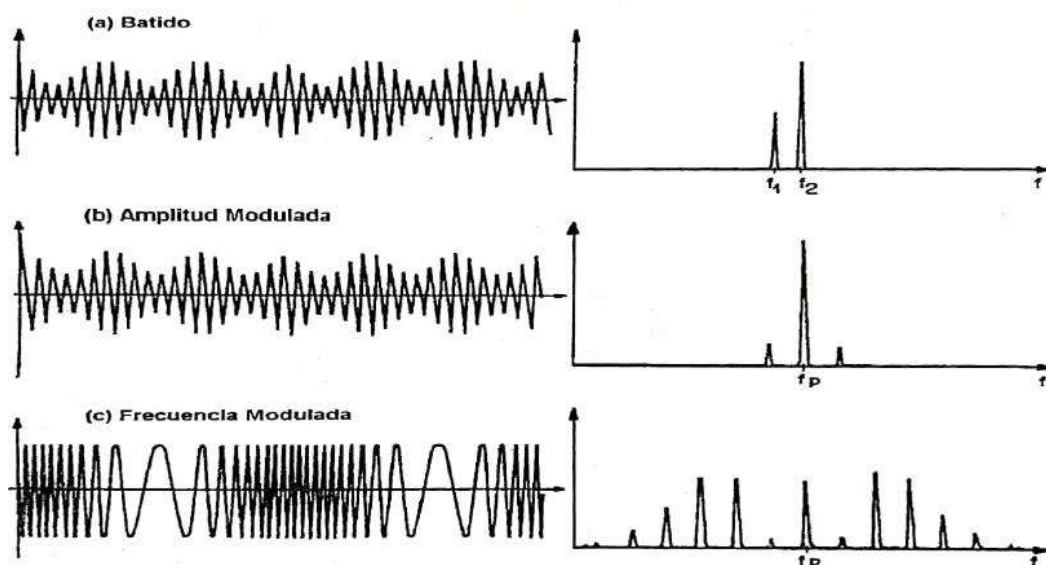


Figura 4.7: Comparación entre (a) Batido, (b) AM, (c) FM.

4.3. Vibraciones en motores de inducción

La figura recoge una distribución estadística de los fallos característicos que suelen tener lugar en estos motores. Además de las formas comunes de fallo, son propensos a otros problemas específicos: pérdidas de aislamiento, pérdida o rotura de barras del rotor, pérdidas de polos y cortocircuitos [11].

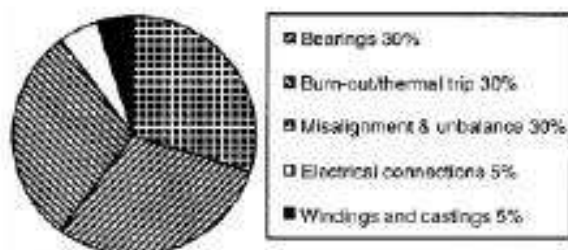


Figura 4.8: Fallos característicos de motores de inducción.

Estas formas específicas de fallo pueden ser registradas incluyendo bandas estrechas que registren la frecuencia de 50 Hz y sus armónicos de 100 y 150 Hz. Si existen problemas eléctricos la frecuencia de línea y sus armónicos señalarán su presencia.

La pérdida o rotura de barras del rotor puede ser detectada registrando la corriente del motor: si existe la condición, la frecuencia de deslizamiento se mostrará claramente como bandas adyacentes a cada lado de la frecuencia de línea. A su vez, la pérdida de polos se mostrará como una frecuencia de paso de polos igual al número de polos multiplicado por la velocidad de giro.

Normalmente, los motores se emplean tanto en posición horizontal como vertical. Los motores horizontales se monitorizan mediante dos puntos de medida radial en los cojinetes interior y exterior. La medida axial no es necesaria. Los motores verticales se monitorizarán de la misma manera, pero requiriendo una medida axial en el cojinete inferior en dirección ascendente.

Los motores cerrados que incluyen un ventilador y algunos motores a prueba de explosión son difíciles de monitorizar. El alojamiento del ventilador de estos motores incluye la tapa de cojinete. El mejor método para adquirir

datos del cojinete exterior es montar transductores sobre las tapas de cojinete y conectarlos a una localización conveniente.

Si esto no es posible, el óptimo consistirá en conseguir la medición en el punto más cercano que pueda tener una conexión mecánica con el cojinete.

En general, con este tipo de máquinas se establecen una serie de bandas estrechas para monitorizar:

- Desequilibrio (1x RPM).
- Desalineación (2x RPM).
- Problemas eléctricos (50,100,150 Hz).
- Defectos en cojinetes (ver cojinetes).
- Pérdida de polos o frecuencia de paso de polos (n° de polos x RPM).
- Roce mecánico o subarmónicos.
- También hay que leer un pico de corriente para comprobar las barras rotas del rotor.

En estos casos, también el escaneado infrarrojo provee una pronta detención tanto de los problemas mecánicos como de los eléctricos que no pueden ser detectados por análisis de vibraciones. Al mismo tiempo, debe adquirirse como mínimo un registrador motorizado de puntos de temperatura. Pueden usarse termómetros de infrarrojos junto con el registrador de datos.

A continuación se relacionan algunos de los problemas electromecánicos más comunes en los motores de inducción, que pueden ser identificados midiendo y analizando correctamente las vibraciones en estas máquinas [11].

- Corrimiento del centro magnético.
- Barras del rotor agrietadas o rotas.

- Corto circuito en el enrollamiento del estator.
- Deformaciones térmicas.
- Pulsos torsionales.

4.3.1. Corrimiento del centro magnético

Esta situación se presenta cuando el rotor no está correctamente ubicado con respecto al centro magnético del estator, ya sea en la dirección axial o en la dirección lateral. Este problema no provoca niveles de vibraciones suficientemente altos por lo que, si el registro de vibraciones no se ejecuta suficiente resolución será prácticamente imposible identificar tal defecto pudiéndose llegar a diagnosticar erróneamente problemas de soldadura mecánica, desalineación o deformaciones permanentes del eje [11].

El corrimiento del centro magnético en los motores de inducción se identifica cuando en los espectros de las vibraciones se observen componentes a la frecuencia de línea o sea 60 Hz y a la frecuencia de operación del motor. Esta última aparecerá acompañada de bandas laterales a la frecuencia de deslizamiento por el número de polos del motor.

4.3.2. Roturas de barras en el rotor

La presencia de roturas en las barras del rotor hace que la frecuencia de rotación del motor sea modulada por el producto de la frecuencia de deslizamiento por el número de polos.

Debido a este fallo mecánico se produce un desbalance eléctrico en el motor, que a la vez genera niveles de vibraciones suficientemente altos a la primera y segunda armónicas de la velocidad de rotación [11].

En la figura se observa un zoom espectral de 40 Hz con frecuencia central de 60 Hz ejecutado sobre un registro de vibraciones tomado en un motor de 3570 rpm (59.5Hz). La frecuencia de deslizamiento es de 0.45 Hz aproximadamente (según la resolución del espectro) por lo cual se puede apreciar bandas laterales de aproximadamente 0.9 Hz.

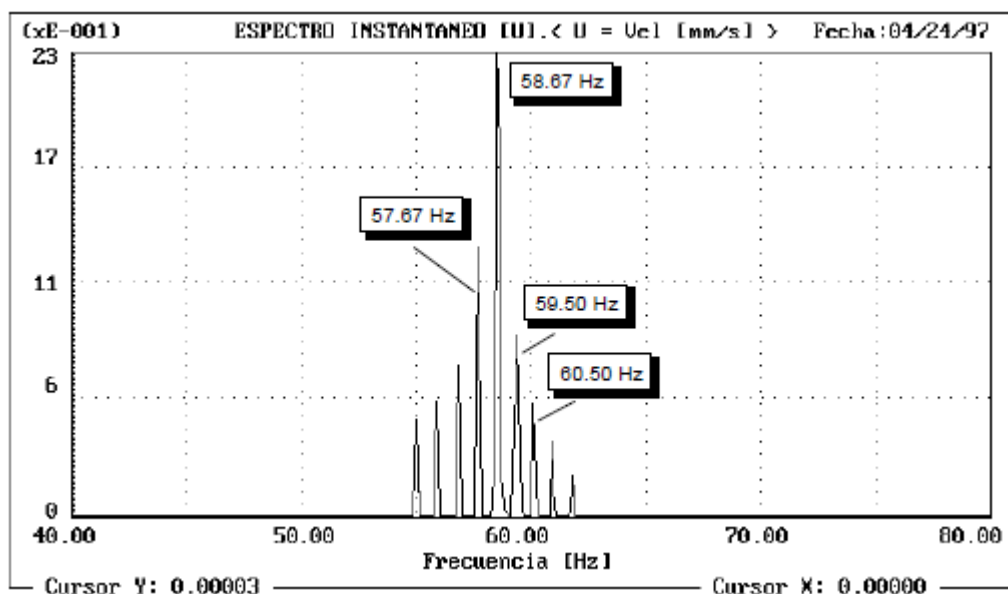


Figura 4.9: Espectro zoom alrededor de la frecuencia de 60 Hz.

4.3.3. Corto circuito en el enrollamiento del estator

El enrollamiento del estator, comúnmente denominado polos puede presentar espiras en corte lo cual hace que disminuya la velocidad de rotación y se incremente la frecuencia de deslizamiento [11].

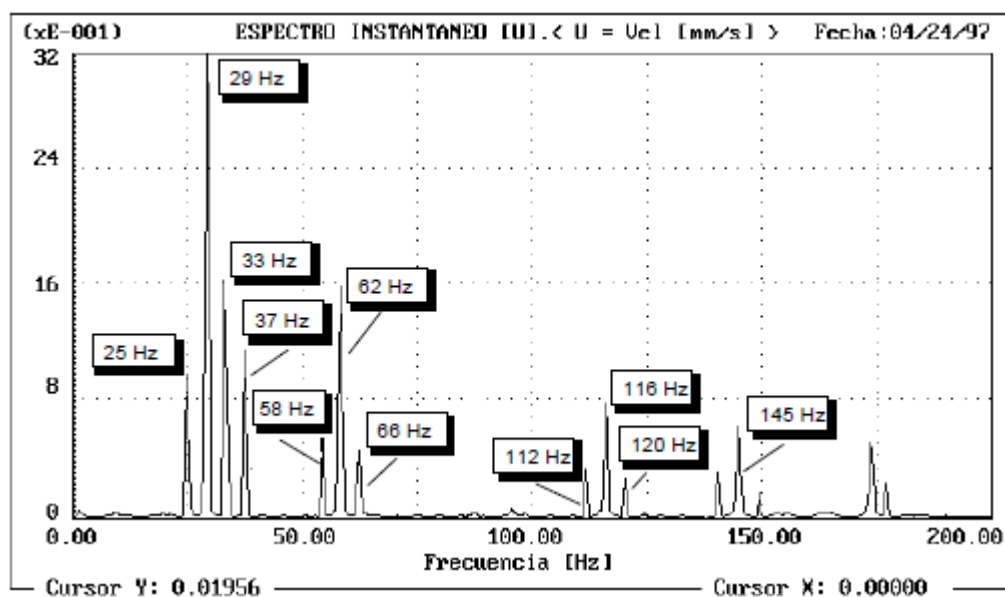


Figura 4.10: Espectro de las vibraciones en un motor de 1740 rpm con cortocircuito en algunas espiras de sus polos.

4.3.4. Deformaciones térmicas

El rotor, también es susceptible de sufrir deformaciones debido a la concentración de altas temperaturas en él, cuyo origen radica en el aislamiento deficiente de varias laminas contiguas en zonas del propio rotor pudiendo provocar roces eventuales de este con el estator.

Este problema trae consigo un efecto de retroalimentación ya que a pesar de que al inicio las deformaciones en el rotor son muy pequeñas, estas hacen que se generen fuerzas electromagnéticas desbalanceadas lo cual a la vez genera mayor incremento en la temperatura haciendo más severas las deformaciones de rotor [11].

Este problema se puede identificar a través de los incrementos sistemáticos en los niveles de vibraciones a la frecuencia de rotación, los cuales se incrementan con el incremento de la temperatura.

4.3.5. Pulsos torsionales

En los motores eléctricos siempre están presentes en mayor o menor medida los pulsos torsionales debido a que el campo magnético rotatorio energiza a los polos del estator. Normalmente esta vibración es suficientemente baja por lo que no representa una amenaza [11].

Sin embargo, pueden existir frecuencias de resonancias cercanas al duplo de la frecuencia de línea o producir vibraciones importantes en máquinas donde se exijan niveles de vibraciones suficientemente bajos, tal es el caso de máquinas herramienta de alta precisión.

4.4. Instrumentos para la medición de vibraciones

El tipo de sensores y técnicas de adquisición de datos empleados en el programa de mantenimiento es un factor crítico que puede determinar su éxito o fracaso. Su precisión, correcta aplicación y apropiado montaje determinarán si los datos obtenidos son o no válidos.

Hay tres tipos de transductores de vibración que pueden usarse para monitorizar las condiciones mecánicas de una planta de maquinaria, cada uno con sus aplicaciones específicas en la planta y sus limitaciones:

- Sonda de desplazamiento.
- Captador de velocidad (velocímetro).
- Acelerómetro.

4.4.1. Sonda de desplazamiento

Las sondas de desplazamiento o de corrientes de fuga se diseñan para medir el movimiento absoluto de un eje de máquina con respecto a la sonda. Por lo tanto, la sonda de desplazamiento deberá montarse rígidamente sobre una estructura rígida con el fin de asegurar un dato seguro y repetible.

Las sondas de desplazamiento montadas permanentemente, suministran los datos más seguros en máquinas con rotor de bajo peso (en relación con la carcasa o estructura portante). Turbinas, compresores y otros componentes suelen llevar captadores de desplazamiento montados permanentemente en posiciones de medida claves para el suministro de datos al programa.

La gama de frecuencias útiles para las sondas de desplazamiento es de 10 a 1.000 Hz (600 a 60.000 r.p.m.). Los componentes en frecuencia fuera de esta gama se distorsionarán y resultarán inútiles para la determinación de las condiciones de la máquina.

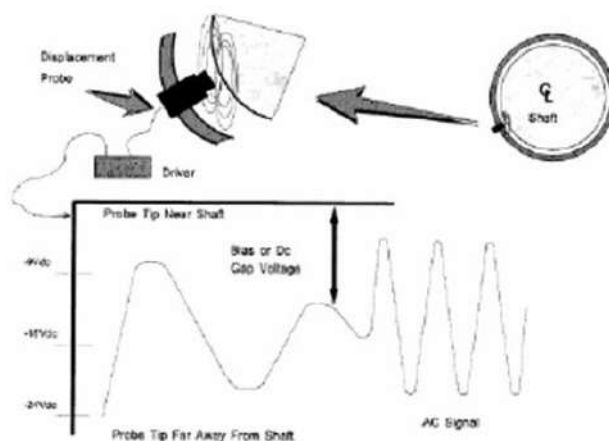


Figura 4.11: Sonda de desplazamiento.

4.4.2. Captador de velocidad (velocímetro)

Los transductores de velocidad (velocímetros) son sensores electromecánicos proyectados para monitorizar o registrar vibraciones relativas. El dato de velocidad es expresado, normalmente, en pulgadas por segundo (i.p.s.) pico y es, quizás, el mejor método para expresar la energía creada por la vibración de la máquina.

Los sensores de velocidad, como las sondas de desplazamiento, tienen una gama efectiva de frecuencias de 10 a 10.000 Hz. No deben ser usados para registrar frecuencias por debajo o por encima de esta gama.

La mayor limitación de los captadores de velocidad es su sensibilidad a los daños mecánicos o térmicos. El uso normal puede causar una pérdida de calibrado y, por lo tanto, debe establecerse un estricto programa de recalibración (por ejemplo, cada seis meses) para prevenir la distorsión de las medidas. Aun así, con calibraciones periódicas, los programas que usan captadores de velocidad son propensos a datos erróneos o distorsionados resultantes de una pérdida de calibrado.

4.4.3. Acelerómetro

Los acelerómetros pueden estar basados en tecnologías diferentes:

- Piezoeléctricos.
- Piezorresistivos.
- Capacitivos.

Los más utilizados son los acelerómetros piezoeléctricos que a partir de un cristal con propiedades piezoeléctricas convierten la energía mecánica del movimiento en señales eléctricas.

Por regla general, las aceleraciones determinadas por este tipo de sensores suelen venir expresadas en términos de la aceleración de la gravedad: g (9.8 m/s²).

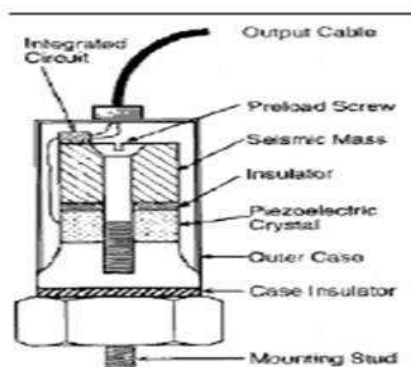


Figura 4.12: Acelerómetro.

Los acelerómetros son susceptibles de averías térmicas. Si se permite que un calor suficiente irradie al cristal es posible que éste se averíe o destruya. Sin embargo, como el tiempo de utilización recomendado es relativamente corto, el daño térmico es raro.

El rango efectivo de los acelerómetros de uso general es de 1 a 10.000 Hz. Aunque pueden encontrarse acelerómetros ultrasónicos válidos para frecuencias de hasta 1 MHz.

4.5. Procedimiento y aspecto a tener en cuenta durante la inspección

4.5.1. Ubicación de los puntos de prueba

En general es deseable colocar el transductor de prueba lo más cerca posible del rodamiento como se muestra en la siguiente figura con metal sólido

entre el rodamiento y el sensor. Se debe evitar la colocación en las gornas de rodamientos, ya que son hechas de metal delgado y conducen muy poco la energía de vibración.

Si es posible habrá que seleccionar los lugares de ubicación de tal manera que no haya juntas entre metal y metal, entre el rodamiento y el sensor. La junta entre la campana y el carter del estator de un motor es un ejemplo de esto. Carter es de ventiladores y las extremidades de motores se deben evitar [12].

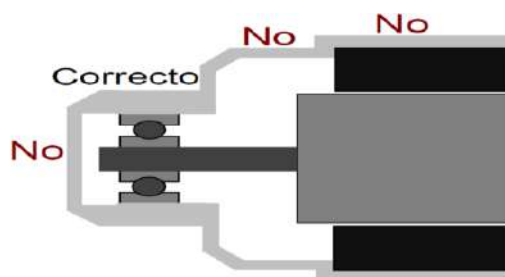


Figura 4.13: Ubicación de acelerómetro.

En general se ha encontrado que para motores de menos de alrededor de 50 HP un punto de prueba es adecuado, pero para motores de más de 50 HP cada rodamiento debería de tener su propio punto de prueba. En las máquinas sensibles a los daños en los rodamientos y en las que los problemas de rodamientos se deberían detectar lo más temprano posible, cada rodamiento debería tener su propio punto de prueba.

4.5.2. Orientación de los sensores de vibración

En cualquier programa de monitoreo de máquinas, el hecho que los datos sean recopilados de manera exactamente igual cada vez que se hace una medición es extremadamente importante. Eso para asegurar que los datos se

pueden repetir y que se pueda establecer una tendencia en el tiempo. Por esa razón no se recomienda el uso de transductores manuales. Los datos los más confiables se recopilan cuando el transductor está montado con botón en la superficie de la máquina [12].

Hay seis posibles combinaciones:

RAT RTA ART ATR TRA TAR

Cada letra representa la relación entre cada uno de los tres canales transductores y el eje de la máquina que está probándose.

A = Axial R = Radial T = Tangencial

4.5.2.1. Numeración del canal del sensor de vibración

El orden en que las letras aparecen es determinado por el número del canal del sensor de vibración, así como su relación con el eje de la máquina (ver tabla 4.1).

Cada uno de los tres canales del sensor se numera para ayudar a asignar los nombres de los ejes a los correspondientes canales del sensor de vibración. Los canales se numeran, cuando la orientación del eje pueda cambiar de máquina a máquina [13].

ORIENTACION	RAT	RTA	ART	ATR	TAR	TRA
Numero de canal	123	123	123	123	123	123

Tabla 4.1: Numeración de canales.

La siguiente ilustración muestra cómo los ejes ortogonales, número de canal, y eje de la máquina se relacionan.

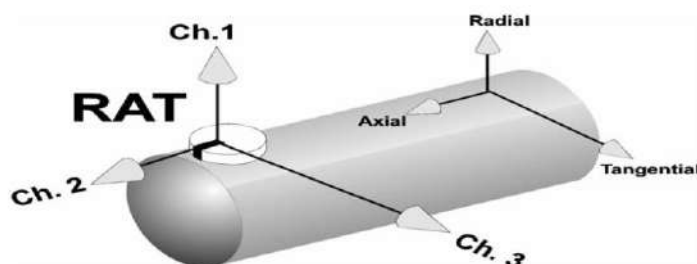


Figura 4.14: Ilustración de punto de muestreo.

Canal uno está en línea con el tornillo y perpendicular a la superficie de la base. Canal dos es opuesto al cuñero de alineación o ranura. Canal tres es perpendicular a ambos canales uno y dos.

Algunas vibraciones en máquinas serán más predominantes en ciertos ejes. Ésta es una pista importante para acceder a las condiciones de la máquina vía el monitoreo de vibración.

Cuando el sensor de vibración se pone en la máquina, cada canal del sensor corresponderá a uno de los tres ejes de la máquina. La relación del sensor con los ejes de la flecha se mantendrá por la “hendidura” de la base montada en cada punto donde se tomará la lectura [13].

4.5.2.2. Mediciones triaxiales

Para ayudar en la determinación de problemas de máquinas es muy útil obtener datos de vibración de cada punto de medición en tres direcciones. Esas direcciones se llaman Axial, Radial, y Tangencial. Axial es la dirección

paralela a la flecha, radial es la dirección desde el transductor hacia el centro de la flecha, y tangencial es 90 grados de radial, tangente a la flecha.

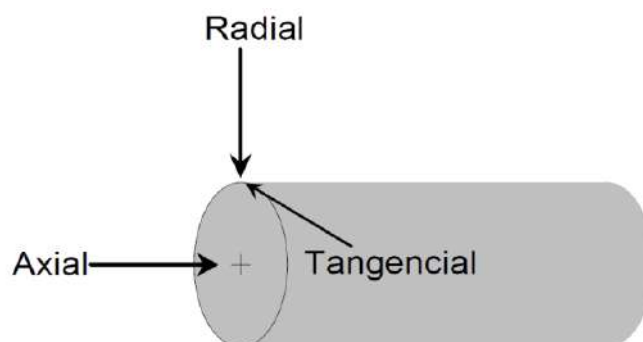


Figura 4.15: Alineación de ejes de vibración.

Realmente son tres transductores en un cárter y están orientados en las tres direcciones ortogonales llamadas radial, tangencial y axial. El transductor está montado por medio de un tornillo a casquillo en un cojín de montaje de bronce especialmente diseñado.

El diseño del cojín asegura que el sensor estará orientado en la misma dirección. Los canales 1, 2 y 3 del sensor pueden estar a diferentes ejes de medición con respecto a la máquina. Por ejemplo: si el sensor está montado encima de un cárter de rodamiento de una flecha horizontal, el canal 1 sería orientado verticalmente, el canal 2 podría ser orientado horizontalmente a 90 grados al eje de la flecha, y el canal 3 podría ser orientado horizontalmente paralelo al eje de la flecha.

Esas direcciones se llaman Radial, Tangencial, y Axial, respectivamente. El archivo inicial de la máquina usa la abreviación RTA para este tipo de montaje. Si el sensor giraría 90 grados alrededor de su eje vertical, la orientación se

llamaría RAT. Es muy importante que el programa conozca la orientación exacta del sensor [12].

4.5.3. Ejemplos de orientación

La siguiente figura enseña las seis orientaciones del sensor para una máquina original [12].

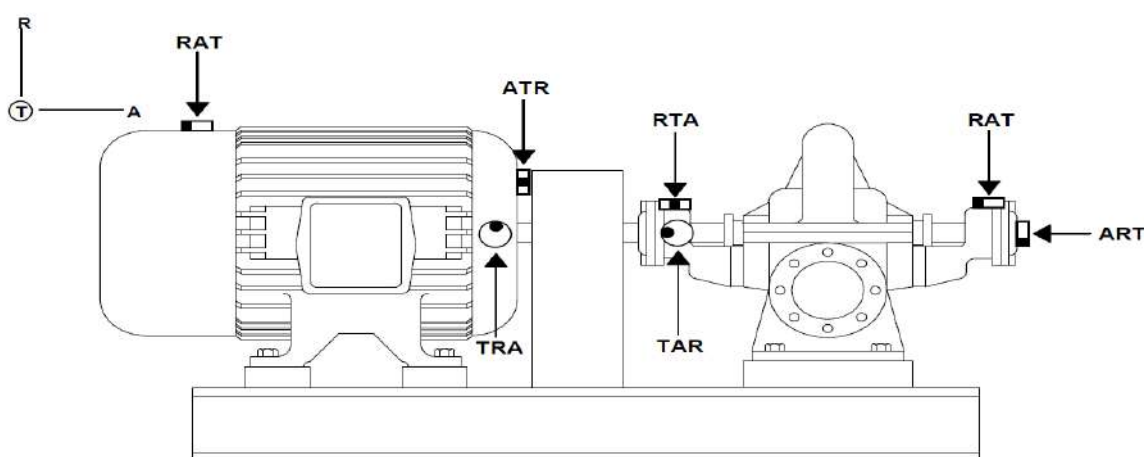


Figura 4.16: Orientación para máquinas verticales R es Radial, T es Tangencial y A es Vertical.

4.5.4. Montaje

Tres problemas determinan la ubicación para las bases de montaje:

- Vía de transmisión: La vía de transmisión de las vibraciones en las máquinas debe ser tan cortas y sólidas como sea posible. (p.e. la vibración del rotor se transmite del rotor, a través de los rodamientos, al armazón de la máquina dónde está acoplada a través de la base magnética al sensor).
- Respuesta en frecuencia: Asegúrese que la superficie de la máquina y la base están lisas y limpias tanto como sea posible.

- Repetibilidad: hay tres maneras de asegurar la repetibilidad. Siempre reemplace las bases dañadas en la misma orientación. Siempre limpie la superficie de contacto antes de coleccionar los datos. Aplique la misma fuerza con el desarmador cuando se monte el sensor como se muestra en la siguiente figura.

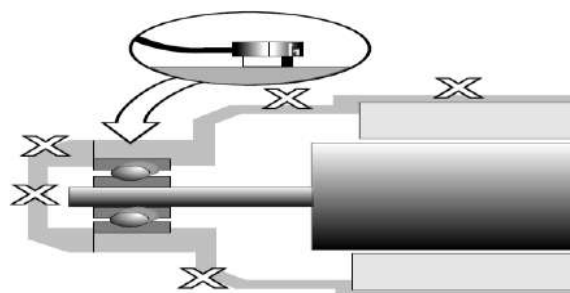


Figura 4.17: Sensor en una sola dirección.

Si usted está reemplazando las bases de montaje perdidas, asegúrese de que localizó EXACTAMENTE el lugar en que estaba ubicada la original. Busque señales del montaje anterior (marcas de despintado, residuos de adhesivo, que las etiquetas de código de barras estén cerca, etc.). Revise el VTAG si usted no puede encontrar primero la marca, o verifique la descripción de la ubicación en el colector de datos (si aplica). Asegúrese de orientar la base correctamente como se especifica en el VTAG [13].

Si usted está instalando una nueva base por primera vez, escoja la orientación que sea conveniente. Asegúrese de grabar la ubicación y orientación para actualizar el software.

4.5.4.1. Preparación de la superficie

Es importante que el punto de unión en la máquina sea tan plano y limpio como sea posible para reforzar el acoplamiento de la vibración. Usando a una

lima plana, quite toda la pintura de un área ligeramente más grande que el tamaño de la base. Asegure que el área que está abajo sea metal. Puede ser necesario tener que poner áspera la superficie para ayudar a que fije el adhesivo.

Límpiese de cualquier limadura o residuo de astilla de pintura resultante de la preparación de la superficie [13].

4.5.4.2. Preparación del adhesivo

El adhesivo consiste en dos partes que no requieren mezclarse. Pinte con el líquido adhesivo la superficie de montaje de la máquina y el lado de la base de montaje que no tenga el hoyo para el tornillo. Permita que el adhesivo se seque durante aproximadamente 20 segundos.

Aplique una pequeña cantidad (del tamaño de una chispa de chocolate) de adhesivo (consistencia de miel) del lado de la base que no tiene hoyo [13].

4.5.4.3. Orientación de la base

Recuerde cuando pegue las bases a la máquina, ser consciente de las estructuras cercanas a la máquina que podrían interferir con el cable en el sensor. Como una regla básica, apunte la hendidura hacia la interferencia ver la siguiente figura.

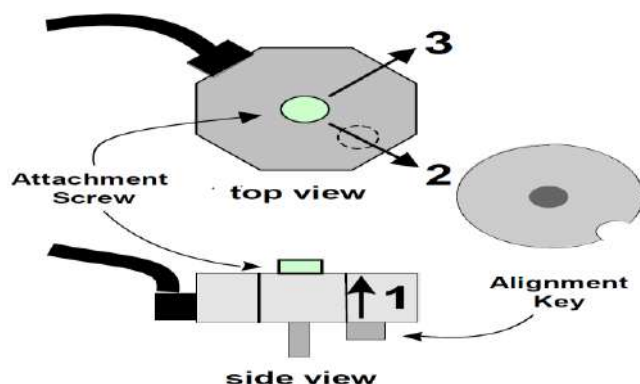


Figura 4.18: Punto de hendidura.

Recuerde canal uno está en línea con la unión del tornillo y canal dos está en línea con la hendidura. Canal tres es transversal a la base y perpendicular a los canales uno y dos [13].

4.6. Estrategias de prueba para inspecciones de vibración

Cuando se lleva a cabo una inspección de vibración de un grupo de máquinas se tendrá que tomar en cuenta los puntos siguientes con el propósito de asegurar la consistencia de los datos desde una medición a la siguiente [12].

4.6.1. Condiciones de prueba

La firma de vibración de una máquina depende en gran parte de sus parámetros de operación y de su estado físico. Los parámetros de operación incluyen factores como velocidad de operación, carga, presión de descarga de la bomba, y presión de entrega del compresor.

La máquina debe estar en condiciones de operación normal, cuando se recopilan datos de vibración. Si eso no fuera el caso, la firma de vibración no sería igual a las firmas de vibración recopiladas anteriormente, y ya no sería

posible establecer una tendencia en el tiempo. Las velocidades de motores a inducción dependen de la carga, y no deberían variar de una recopilación a la siguiente con más de unos porcientos. Eso quiere decir que las condiciones de carga deben ser las mismas tanto como sea posible.

El nivel de vibración agregado por fuentes extrañas como máquinas cercanas, también deberá ser lo mismo cada vez que se recopilen datos. No recopilen datos con las máquinas cercanas apagadas, si los espectros anteriores fueron recopilados mientras que éstas estaban funcionando.

Eso es especialmente válido con un nivel de vibración de fondo alto como por ejemplo en un cuarto de máquinas de un barco. Motores Diésel de propulsión deben estar operando a la misma velocidad durante cada sesión de recopilación de datos [12].

4.6.2. Condiciones de operación

Es de suma importancia, que cuando se recopilan datos, las RPM de la prueba estén muy cerca de las RPM que se usaron en pruebas anteriores. En equipo accionado por turbinas, la velocidad se debe verificar usando un tacómetro estroboscópico portátil u otro, y la velocidad debe ser constante sin variaciones. Las presiones de las sondas deben ser el reflejo de las condiciones de operación normal.

No se recomienda probar las bombas con las válvulas de descarga cerradas, pero si hay que probar una bomba en una situación de recirculación, se puede cerrar parcialmente la válvula de recirculación para llegar a una presión de descarga normal [12].

4.6.2.1. Calentamiento

Todas las máquinas deben ser probadas totalmente calentadas. La temperatura de la máquina afectará la alineación y los juegos en operación debido a la expansión termal. Una máquina fría tendrá una firma de vibración diferente de una máquina caliente y esas pueden a veces ser totalmente diferentes [12].

4.6.2.2. Inspección visual

Es importante la inspección visual de una máquina en operación mientras que se está probando la vibración, ya que se pueden descubrir indicaciones variables acerca del estado de la máquina. Se debe notar las RPM y la presión de descarga. Los puntos siguientes deben ser verificados [12].

¿Hay algunos ruidos?

¿Algunos rodamientos se sienten más calientes que normal?

¿Se puede sentir un nivel de vibración excesivo?

¿Hay algunas fugas de vapor o de fluidos aparentes?

¿Los valores que indican los metros parecen normales?

¿El operador de la máquina hace algunos comentarios acerca del estado de la máquina?

4.6.2.3. Preparación de la máquina para el análisis de vibraciones

Una vez que usted tiene una buena comprensión de los procesos dinámicos de la maquinaria, está listo para ir a las máquinas y poner el sensor,

las bases y las etiquetas de código de barras. El Sistema Experto agrupa máquinas con datos de placas de identificación idénticos usando una Identificación Designada a Máquina (MID).

Un MID es un nombre de familia y cada máquina es considerada como un miembro de esa familia. El Sistema Experto trata un tren de máquinas como la suma de sus componentes por lo que usted debe segmentar el tren en componentes. Estas son algunas pautas para preparar una máquina [13].

4.6.2.4. Inspeccione la máquina

- Localice todos los rodamientos. Determine si tienen contacto rodante o cojinetes.
- Localice todos los acoples. Determine si son acoples flexibles o rígidos.
- Localice los componentes rotatorios. (rotores, engranes, impulsores).
- Determine los códigos de los componentes que se usarán con el Sistema Experto.
- Determine la ubicación requerida por el Sistema Experto.
- Determine la mejor ubicación para adherir las bases de montaje para el sensor. La carcasa del motor del ventilador, aspas del motor de refrigeración, las espirales de la bomba, la cubierta de placa de metal del motor, las áreas huecas (resonante) y similares no son ubicaciones aceptables.
- Prepare la superficie con una lima. Se requiere una superficie llana, libre de pintura, óxido y aceite.
- Adhiera las bases en la máquina. Debe tener contacto de metal con metal propiamente con la muesca alineada.
- Una las bases exactamente en máquinas de tipos similares (MIDs).

- Determine la orientación. (RAT, ART.).
- Determine el número de rodamientos (1, 2, 3, etc.).
- Adhiera la etiqueta con código de barras en un lugar conveniente cerca de cada base.
- Use un tacómetro estroboscópico o manual para obtener la velocidad del eje si esta es desconocida.
- Si es con transmisión por bandas, mida los diámetros de la polea y la distancia de la línea central entre los ejes [13].

4.6.2.5. Rangos de severidad de vibraciones

El rango de severidad para máquinas pequeñas (clase I), máquinas de Tamaño mediano (clase II), grandes máquinas (clase III), y turbo máquinas (clase IV).

RANGO DE SEVERIDAD DE VIBRACION		CLASES DE MÁQUINAS			
VELOCIDAD RMS (mm/s)	VELOCIDAD 0-PK (mm/s)	CLASE I	CLASE II	CLASE III	CLASE IV
0.28	0.3960	A	A	A	A
0.45	0.6364				
0.71	1.0041				
1.12	1.5839	B	B	B	B
1.8	2.5456				
2.8	3.9598	C	C	C	C
4.5	6.3640				
7.1	10.0409	D	D	D	D
11.2	15.8392				
18	25.4558				
28	39.5980				
45	63.6396				
71	100.4092				
FSM para las máquinas		1.57020	1	0.62608	0.39625
FSN para los niveles (1/FSM)		0.63686	1	1.59725	2.52364

Tabla 4.2: Cuadro de severidad de vibraciones.

Nota:

FSM: factor de servicio para las clases de máquinas.

FSN: factor de servicio para los niveles.

La anterior es una de las clasificaciones recomendadas para la escogencia del factor de servicio de una máquina. Pero como se ha dicho no está dada para todas las aplicaciones y por lo tanto puede sustituirse de acuerdo a situaciones particulares que se presenten. El significado de estas clases se presenta a continuación [9]:

CLASE I: Partes individuales que se conectan a una máquina en operación normal. (Los motores eléctricos que no pasan de 15 kW son ejemplos típicos de esta categoría).

CLASE II: Máquinas de tamaño medio (generalmente motores de 15 a 75 kW de salida), sin cimientos especiales, o máquinas rígidas (por encima de 300 kW) montadas sobre cimientos especiales.

CLASE III: Grandes motores y otras máquinas con grandes masas rotantes montadas sobre cimientos rígidos y pesados, los cuales son relativamente duros en la dirección de medida de vibración.

CLASE IV: Grandes motores y otras máquinas con grandes masas rotantes montadas en cimientos relativamente flexibles en la dirección de la medida de vibración (por ejemplo, un turbogenerador, especialmente aquellos con subestructuras ligeras).

Fuera de éstas clases, también existen otras dos que se dan para maquinaria extremadamente robusta o especial que necesita factores de servicio aún más grandes.

CLASE V: Máquinas y sistemas de conducción mecánica con esfuerzos de desbalanceo inerciales (debido a partes reciprocantes) montadas sobre cimientos, los cuales son relativamente rígidos en la dirección de la medida de vibración.

CLASE VI: Máquinas y sistemas de conducción mecánica con esfuerzos de desbalanceo inerciales (debido a partes reciprocantes) montadas sobre cimientos, los cuales son relativamente suaves en la dirección de la medida de vibración; también pertenecen máquinas con rotación de masas flojas acopladas, tal como golpeteo de eje en un molino; máquinas centrífugas con desbalanceo variable capaces de operar sin componentes conectados; pantallas de vibración, máquinas de prueba de fatiga dinámica y excitadores de vibración usados en plantas de proceso [9].

4.6.2.6. Niveles de tendencia

La tendencia se puede definir como una representación gráfica de alguna variable respecto al tiempo. Para nuestro caso, la variable es el nivel general de vibración de los puntos de una máquina. En esta gráfica puede observarse la pendiente de los puntos a través de su historia. Siempre y cuando la pendiente sea suave, la tendencia permanecerá estable. Pero si llega a presentarse un crecimiento grande, acercándose a una elevación exponencial, en la mayoría de casos es porque se acerca una falla física de la máquina [9].

Los niveles de vibración a través de la historia de la máquina variarán entre períodos. Esto se debe a que el nivel de vibración es inferido a través de promedios. Esto será normal siempre y cuando no haya un cambio abrupto en el nivel de vibración de manera que la pendiente se incremente considerablemente.

La siguiente figura muestra la tendencia de un soplador. Hasta la medición del día 330 la tendencia es estable, sin embargo, a partir de esta medición los niveles de vibración se incrementan abruptamente. A través del monitoreo de vibraciones se pudo predecir el mal estado de un rodamiento en la polea conducida del soplador, lo cual podría haber producido un paro súbito de la máquina.

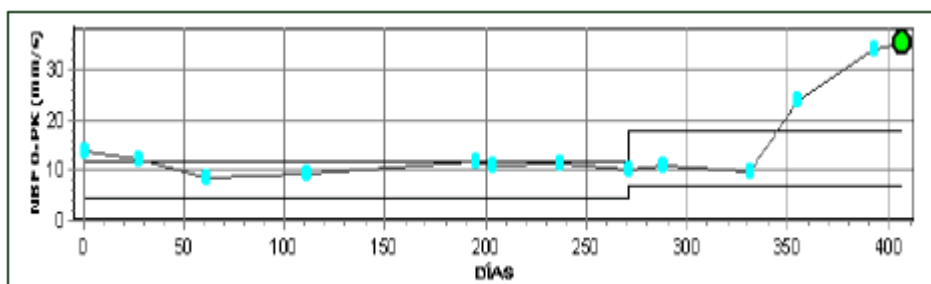


Figura 4.19: Nivel de tendencia de vibraciones.

CAPITULO 5

Proceso de Producción y Características de Motores Críticos

5.1. Descripción de procesos

A través de una entrevista en la planta alcohólica se definieron los procesos críticos de producción, los cuales cuentan con motores indispensables en la fase productiva en la industria, dichos motores corresponden a los sectores de molienda (mesa alimentadora), caldera y captación de agua.

Los motores de estos sectores necesitan de un seguimiento y control continuo para operar con eficiencia y no afectar la producción de la industria. Se constataron que las mismas no cuentan con un plan de mantenimiento adecuado que garantice su confiabilidad y disponibilidad durante el proceso productivo.

La cantidad y características de motores por sector se detallan a continuación.

5.1.1. Sector molienda (Mesa alimentadora)

La mesa alimentadora está posicionada entre recepción de materia prima y molienda donde se encuentra instalada una cinta transportadora cuya función es transportar la caña de azúcar para su respectiva molienda. Dicha cinta transportadora es accionada por dos motores eléctricos que necesitan ser inspeccionados de manera continua para no cortar el proceso productivo con una falla en las mismas.

En el esquema se ilustra la disposición de los motores en dicho sector con sus características respectivas.

5.1.1.1. Esquema de disposición de motores

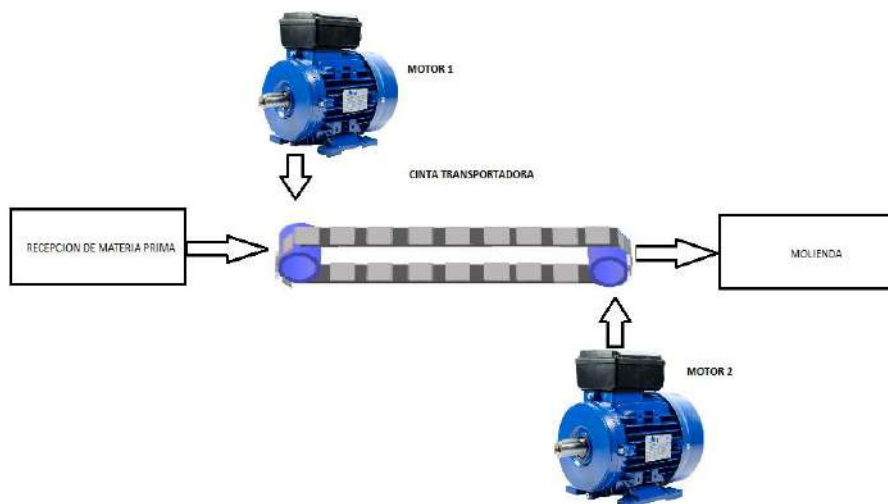


Figura 5.1: Motores de la cinta transportadora.

5.1.1.2. Característica de motores

CARACTERISTICAS MOTOR MOLIENDA	
Marca	BUFALO
Maquina acoplada	Reductor
Tipo de arranque	Variador de frecuencia
Tensión de alimentación	380 V
Velocidad	1460 rpm
Potencia	40 hp

Tabla 5.1: Características motor 1,2.

5.1.2. Sector caldera (exhaustor izquierdo, derecho)

La caldera de la industria es alimentada con el gabazo de la caña de azúcar después de pasar por molienda. Esta misma es utilizada para generar energía eléctrica en la planta, dicho sector cuenta con dos motores de gran potencia cuya función es bombear agua caliente al balón de agua.

En la figura se muestra la disposición de los motores con sus características respectivas.

5.1.2.1. Esquema de disposición de motores

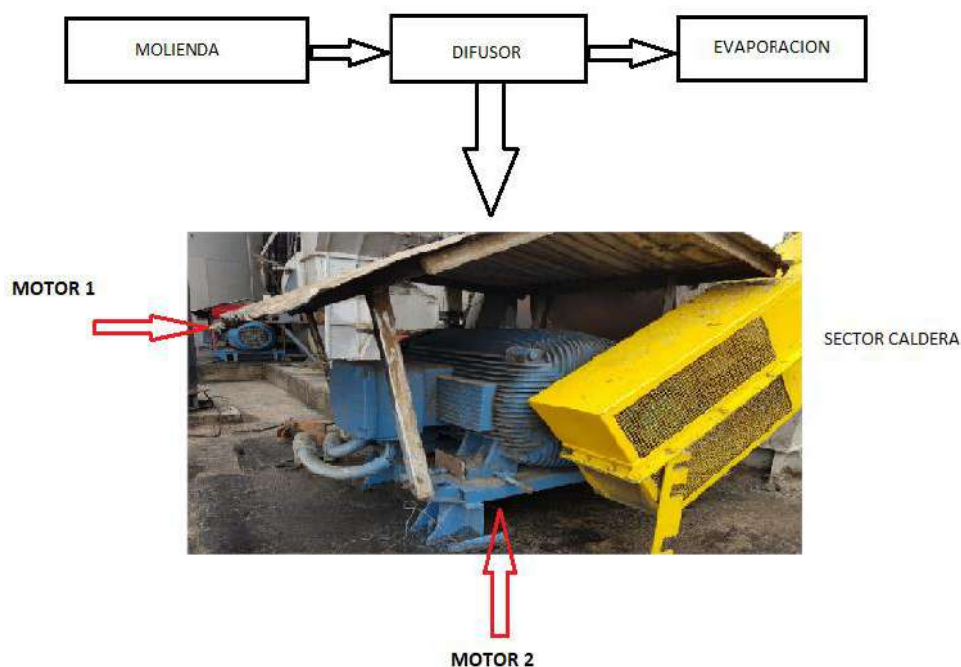


Figura 5.2: Motor exhaustor.

5.1.2.2. Característica de motores

CARACTERISTICAS MOTOR EXHAUSTOR	
Marca	WEG
Maquina acoplada	Bomba
Tipo de arranque	Suave
Tensión de alimentación	220/380 V
Velocidad	2970 rpm
Potencia	350 hp

Tabla 5.2: Características motor 1,2.

5.1.3. Sector captación de agua

El proceso de captación de agua se efectúa a orillas del río distante a unos 2 km de la planta industrial donde se bombea agua hasta la destilería a través de 5 motores eléctricos.

En el esquema se ilustra la disposición de los motores en dicho sector con sus características respectivas.

5.1.3.1. Esquema de disposición de motores

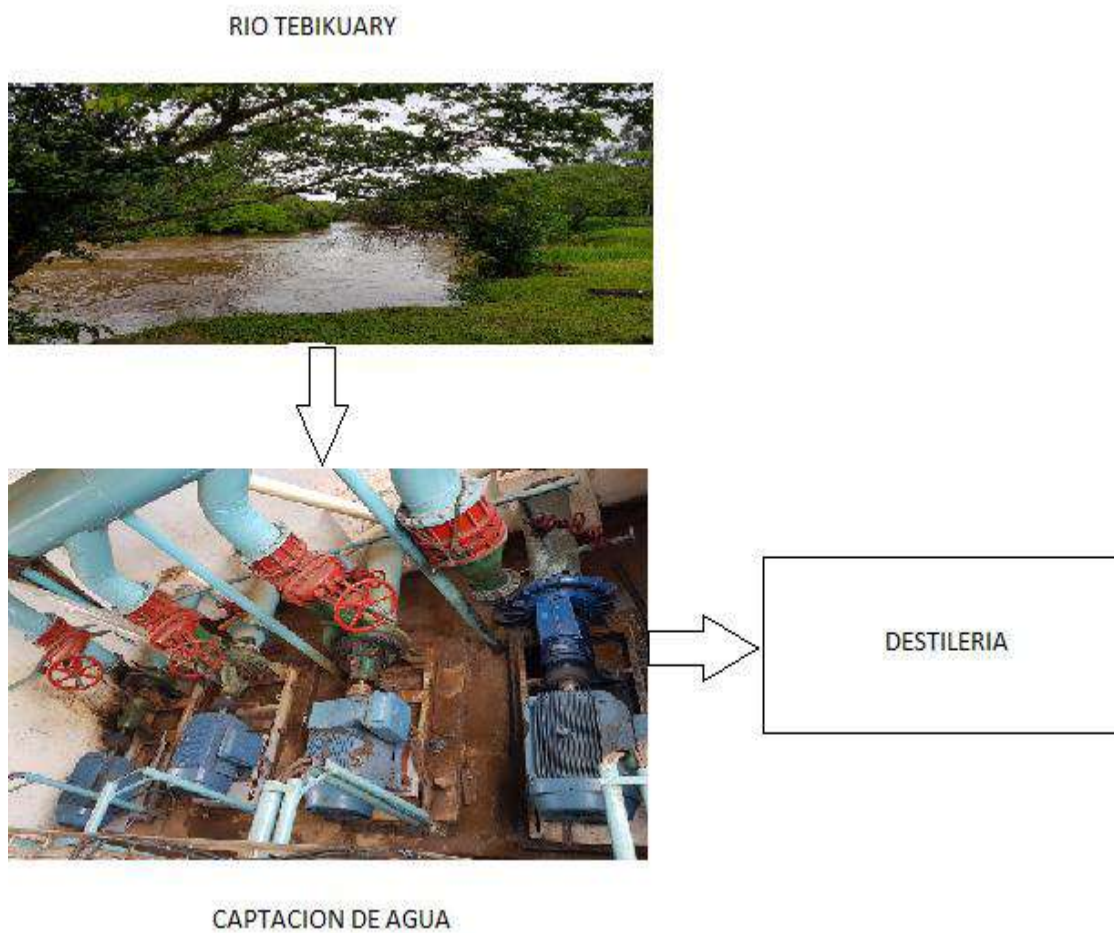


Figura 5.3: Sector captación.

5.1.3.2. Característica de motores

CARACTERISTICAS MOTOR CAPTACION DE AGUA: 1	
Marca	WEG
Maquina acoplada	Bomba
Tipo de arranque	Suave
Tensión de alimentación	380 V
Velocidad	1485 rpm
Potencia	250 hp
CARACTERISTICAS MOTOR CAPTACION DE AGUA: 2,3,4.	
Marca	WEG
Maquina acoplada	Bomba
Tipo de arranque	Suave
Tensión de alimentación	380/660 V
Velocidad	1485 rpm
Potencia	250 hp
CARACTERISTICAS MOTOR CAPTACION DE AGUA: 5	
Marca	WEG
Maquina acoplada	Bomba
Tipo de arranque	Suave
Tensión de alimentación	380 V
Velocidad	1480 rpm
Potencia	150 hp

Tabla 5.3: Características motores captación de agua.

CAPÍTULO 6

EVALUACION ECONOMICA

6.1. Método de Evaluación

Para la evaluación de la rentabilidad de un proyecto, se utilizará el método Beneficio/Costo, esto requiere identificar cuáles son los costos y cuáles son los beneficios y compararlos. Para ello, serán utilizadas el VPN y el TIR como herramientas financieras.

6.1.1. Valor Presente Neto (VPN)

El VPN o también conocido como VAN (Valor Actual Neto), es un método muy utilizado para saber si un proyecto es viable o no. Se mide los flujos de los futuros ingresos y egresos que tendrá un proyecto, para determinar, si luego de descontar a la inversión inicial, nos quedaría alguna ganancia.

En términos formales de evaluación económica, cuando se trasladan cantidades del presente al futuro, se dice que se utiliza una tasa de interés, pero cuando se trasladan cantidades del futuro al presente, como en el cálculo del VPN, se dice que se utiliza una tasa de descuento o TMAR.

La TMAR (tasa mínima aceptable de rendimiento), es una tasa de rendimiento fijada por el inversionista que tomo en cuenta las circunstancias expuestas y, por lo tanto, es el punto de referencia para decidir sus inversiones.

La ecuación para el cálculo del VPN es:

$$VPN = -P + \frac{FNE1}{(1+i)^1} + \frac{FNE2}{(1+i)^2} + \dots + \frac{FNE_n}{(1+i)^n}$$

Donde:

FNE_n = Flujo neto de efectivo del año n , que corresponde a la ganancia neta después de impuestos en el año n .

P = Inversión inicial en el año cero.

i = Tasa de referencia a la TMAR (tasa de inflación + premio al riesgo)

- Si el $VPN > 0$: Es conveniente aceptar la inversión, ya que se estaría ganando más del rendimiento solicitado.
- Si el $VPN < 0$: se debe rechazar la inversión por que no estaría ganando el rendimiento mínimo solicitado.
- Si el $VPN = 0$: también se debe aceptar la inversión, porque ya es estaría ganando exactamente la TMAR.

6.1.2. Tasa Interna de Rendimiento (TIR)

La ganancia anual que tiene cada inversionista se puede expresar como una tasa de rendimiento o de ganancia anual llamada tasa interna de rendimiento.

El valor de la TIR se encuentra cuando el VPN se vuelve cero y representa el interés más alto que un inversionista podría pagar sin perder dinero.

Al igualar el VPN a cero, la única incógnita que queda es la i , tal como se puede observar la siguiente ecuación:

$$VPN = 0 = -P + \frac{FNE_1}{(1+i)^1} + \frac{FNE_2}{(1+i)^2} + \dots + \frac{FNE_n}{(1+i)^n}$$

La tasa calculada se compara con la tasa fijada por el inversionista (TMAR). Si la TIR es igual o mayor que esta, es recomendable aceptar la inversión y si es menor debe rechazarse.

6.1.3. Periodo de retorno de inversión (PRI)

Es un instrumento que permite medir el plazo de tiempo que se requiere para que los flujos netos en efectivo de una inversión recuperen su costo o inversión inicial.

El periodo de retorno de la inversión se calcula mediante la siguiente expresión:

$$PRI = [PUFAN] + \left[\frac{ABS}{VFCSP} \right]$$

Donde:

PUFAN: Periodo ultimo con flujo acumulado negativo.

ABS: Valor absoluto del ultimo acumulado negativo.

VFCSP: Valor del flujo de caja en el siguiente periodo.

6.1.4. Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad indica las variables que más afectan en el resultado económico de un proyecto y las que tienen poca incidencia en el resultado final del mismo.

Es recomendable realizar el análisis de sensibilidad en variables en las que no se tenga un valor completamente definido.

I. RESUMEN EJECUTIVO

CAPITULO 7

7.1. Descripción del trabajo

El proyecto de fin de grado consistió en la búsqueda y selección de nuevas tecnologías de mantenimiento para inspección de los motores en los procesos críticos para la reducción de costos en adquisición de insumos disminución de averías, paradas no programadas y detección de fallas en sus etapas iniciales permitiendo corregirlas en su debido tiempo, durante el periodo de elaboración de este proyecto se realizó muchas visitas a la planta industrial para observar detenidamente los procesos y las máquinas presentes en cada fase de producción, esto se hizo en compañía de funcionarios del departamento de mantenimiento a través de las reuniones, comentándoles el objetivo del proyecto facilito el acceso a todos los datos requeridos para el desarrollo del mismo.

Con las tecnologías predictivas disponibles hoy en día se optó por dos técnicas de inspección que más aplica para monitoreo de condiciones de motores en conjunto con sus tableros de alimentación. Se tuvo muy en cuenta las fallas más comunes presentes en las mismas para el análisis de las técnicas de inspección.

Para selección de las técnicas se experimentó las dos inspecciones haciendo las pruebas en los motores de los procesos críticos demostrando muchos inconvenientes presentes en las mismas coincidiendo con las fallas comunes de los motores, demostrando de esta manera la utilidad de estas tecnologías para detectar las fallas.

7.1.1. Métodos y Técnicas utilizadas

El tipo de investigación empleado en este estudio corresponde a una investigación de campo, debido a que hay una recolección de datos reales de los motores eléctricos de la industria alcoholera para diagnosticar necesidades y problemas en las mismas. También obedece a la investigación no experimental porque no se manipulan variables en estudio.

Para la recolección de datos se recurrió a la sección de mantenimiento de la industria y mediante entrevistas, pruebas, tendencias referentes a la problemática en estudio, poder recopilar los datos, características y condiciones de operación de los motores considerados con ayuda de instrumentos de medición.

7.2. Justificación

La planta alcoholera de Petropar registra paradas no planificadas en cada periodo de zafra por la que se requiere servicio del mantenimiento predictivo ya que las acciones preventivas y correctivas no son suficientes para mantener una confiabilidad y continuidad en los procesos productivos de la industria.

Con la implementación del mantenimiento predictivo en los motores críticos de la industria alcoholera se podrán detectar las fallas desde sus etapas incipientes con la cual nos permitirá prever con suficiente tiempo las necesidades de mantenimiento en la industria, también con tiempo planificar los recursos tanto humanos como materiales para evitar que las fallas se manifiesten en una falla más grave durante la operación, reduciendo de esta manera los costos de mantenimiento, aumentando también la vida útil de sus maquinarias y mejorando la confiabilidad del sistema de producción. Además,

es una técnica que puede ser llevada a cabo durante el funcionamiento normal del equipo y permite planificar de forma óptima las acciones de mantenimiento.

Esto beneficiará directamente a la planta alcoholera de Petropar ya que se aumentará la confiabilidad y eficiencia en la producción de alcohol. También se beneficiarán los productores agrícolas de caña de azúcar ya que la fábrica es la economía principal de Mauricio José Troche y zonas aledañas.

7.3. Finalidad del proyecto

Con el desarrollo del proyecto se demostró que la planta alcoholera tiene la posibilidad de mejorar su plan de inspección con nuevas tecnologías para aumentar la confiabilidad en el funcionamiento de sus motores con las inspecciones por vibraciones y termografía, constatando que mediante las técnicas puede evitarse inmensa cantidad de problemas permitiendo solucionarlas en sus fases iniciales evitando que una avería pequeña llegue a uno más compleja, disminuyendo de esta manera los costos en solucionar las fallas y las pérdidas por parada.

7.4. Metas

Con el proyecto se pretende implementar al menos 3 inspecciones por termografía y 2 de vibraciones a los 9 motores de sectores críticos, realizable durante la zafra periodo 2020 plazo no mayor de 5 meses.

7.5. Objetivos

7.5.1. Objetivos generales

Definir la factibilidad de implementación del mantenimiento predictivo en los motores críticos de la industria alcoholera.

7.5.2. Objetivos específicos

- Relevar datos y fallas típicas de los motores críticos de la industria alcoholera pertenecientes a los sectores de mesa alimentadora, sector caldera y captación de agua.
- Estudiar técnicas de mantenimiento predictivo que más aplican según fallas comunes de motores.
- Describir procedimientos de las técnicas de inspección aplicado a motores de la industria alcoholera.
- Simular mediciones mediante técnicas predictivas para la obtención de parámetros de operación de los motores.
- Analizar la viabilidad de implementación del mantenimiento predictivo.

7.6. Beneficiarios

Los principales beneficiarios de este proyecto son los productores de caña de azúcar, por la disminución de fallas que presenta la implementación de esta tecnología y de esta manera los productores podrán comercializar todos sus cultivos en su tiempo debido, la planta alcoholera conseguiría un ahorro importante con la reducción de paradas y de averías más complejas reduciendo repuestos en stock. Además, estas tecnologías de monitoreo se puede hacer durante operación de la planta en tiempo real sin la necesidad de parar la producción para la inspección.

7.7. Producto

El producto es la elaboración del proyecto de mejoramiento y actualización de las inspecciones de mantenimiento de 9 motores de tres sectores del

proceso de elaboración de alcohol que resulte en mejoras técnicas como económicas a través de la implementación de estas nuevas tecnologías.

7.8. Localización física y cobertura espacial

El proyecto está enfocado en presentar propuesta técnica y económica de implementación de nuevas tecnologías de inspección predictiva en la planta industrial Petropar, localizada en la ciudad de Mauricio José Troche distrito del departamento del Guaira.

7.9. Especificaciones de actividades y tareas realizadas

El proyecto de fin de grado comenzó con una revisión bibliográfica todo lo referente a motores, tipos de mantenimientos existentes, tecnologías de inspecciones por vibraciones, termografía y los métodos de interpretación de datos para análisis.

Para hacer la recolección de datos se visitó en principio la planta industrial específicamente en el departamento técnico de mantenimiento solicitándoles informaciones de las condiciones de operación de la planta los procesos más críticos e importantes en línea de producción. Luego se hizo una recolección de datos, características de los motores y las fallas típicas presentes en las mismas durante periodo de producción.

Se realizó un estudio de las técnicas de inspección predictiva aplicado a motores eléctricos y sus tableros de alimentación tomando referencia siempre las fallas típicas comunes presentes.

Con las tecnologías de vibraciones y termografía se hizo las pruebas correspondientes para cerciorar el estado de condición de los motores de las fases de producción críticas, mediante esto se pudo constatar las malas

condiciones de operación de los motores y la falta de mejoras en el plan de mantenimiento existente.

Una vez obtenido los resultados de condición a través de técnicas de vibración y termografía, este último análisis se hizo con el software SmartView para la elaboración de informe de pruebas y mediante tablas de severidad para interpretación de las mismas al igual que las de vibraciones.

7.10. Recursos necesarios

7.10.1. Recursos humanos

Este proyecto final de grado fue elaborado por el alumno proyectista de la Facultad de Ciencias y Tecnologías – UNCA carrera de Ingeniería en Electricidad, con el apoyo del Asistente de proyecto final de grado, Ingeniero tutor y personales técnicos del departamento de mantenimiento de la planta alcoholera Petropar.

7.10.2. Recursos materiales

Los recursos materiales que fueron necesarios son:

- Computadora y calculadora (Propio).
- Cuadernos (Propio).
- Software de análisis (gentileza de Rieder & CIA.).
- Cámara termográfica (gentileza de Rieder & CIA.).
- Analizador de vibraciones Microlog CMXA-75-GX (gentileza Ing. Federico Cabrera).
- Medios de transporte (Propio).

7.11. Factibilidad técnica

El proyecto desarrollado es factible técnicamente, pues mediante la misma se puede obtener:

- Mejora en la calidad y confiabilidad en el sistema de producción, con la detección anticipada de posibles fallas en los sectores críticos.
- Reducción de tiempos de parada y costos de reparación por trabajos correctivos de emergencia.
- Mejora de proceso mediante planificación de paradas programadas y gestión de los repuestos antes de que ocurra una falla utilizando los semáforos de Alerta - Alarma que cuenta el estándar de vibraciones y termografía.
- Reducción de fallas de mayor complejidad y más costosas detectando los problemas en sus fases iniciales, permitiendo solucionarlas antes de que se presenten fallas en plena producción.

7.12. Factibilidad económica

7.12.1. Beneficios

7.12.1.1. Reducción de tiempos de parada

Las fallas en máquinas y paradas de producción son comunes en la planta industrial por las malas condiciones y falta de seguimiento de los equipos. A continuación, se detallan el promedio de horas parada por cada periodo de producción.

7.12.1.1.1. Promedio de parada periodo 2016 y 2017

En base a cálculos el promedio de horas de parada que afecta a los sectores críticos de mesa alimentadora, sector caldera y captación de agua es de 79,35 hs por cada zafra.

Los detalles del cálculo se muestran en el Apéndice A.3.- Promedio de paradas periodo 2016, 2017 – Horas de parada por zafra.

7.12.1.1.2. Perdidas por parada de producción

Las pérdidas por parada de producción durante un periodo de 3 días llevan a unos 290.160 litros de alcohol no elaborado, ver Apéndice A.3 – Tabla A.3.3. – Alcohol absoluto no elaborado.

Esto genera pérdidas de 261.144.000 Gs por cada periodo de zafra.

Los cálculos detallados se presentan en el Apéndice A.3. –Tabla A.3.4. Perdidas por parada.

7.12.2. Comparativo de costos para inversión

Para la aplicación de las tecnologías predictivas por vibraciones y termografía se ha realizado un comparativo de inversión que abarca los puntos necesarios para la obtención de resultados satisfactorios.

7.12.2.1. Costos de inversión en adquisición de equipos para efectuar pruebas

La inversión necesaria para adquisición de equipos de termografía y vibraciones en conjunto con los cursos a ser tenidos en cuenta para tener la

capacidad de medición e interpretación de resultados es de 225.280.000 Gs, ver detalles en Apéndice A.4. - Tabla A.4.1.

7.12.2.2. Costos de inversión contratando los servicios de inspección

El costo total de contratación de servicios para inspección por termografía y vibraciones a los 9 motores en estudio de manera anual es de 1.170 USD.

Los detalles del costo se muestran en el Apéndice A.4.2 – Costos de servicio de inspección por termografía y vibraciones.

7.12.2.3. Elección de método de inspección

Haciendo el Comparativo de costeo entre contratación de servicio y adquisición de equipos para inspección tenemos gran diferencia en inversión económica. Por la cual se opta por contratar el servicio de las inspecciones predictivas ya que el costo de inversión requerido es menor.

Las comparaciones se muestran en el Apéndice A.4. – Tabla A.4.5. Comparativo de costos.

7.12.3. Evaluación económica

7.12.3.1. Determinación del flujo de caja proyectada

Teniendo los costos de inversión, las cuales se toman como base para la elaboración del flujo de caja proyectado de las inversiones y ahorros que se tendrán haciendo la implementación de las tecnologías de inspección predictiva contratando el servicio proyectando para un lapso de 3 años, cuyos cálculos están detallados en el Apéndice C.1 - Determinación de la Tasa Interna de

Retorno (TIR), Valor Actual Neto (VPN) y el Periodo de Retorno de la inversión (PRI).

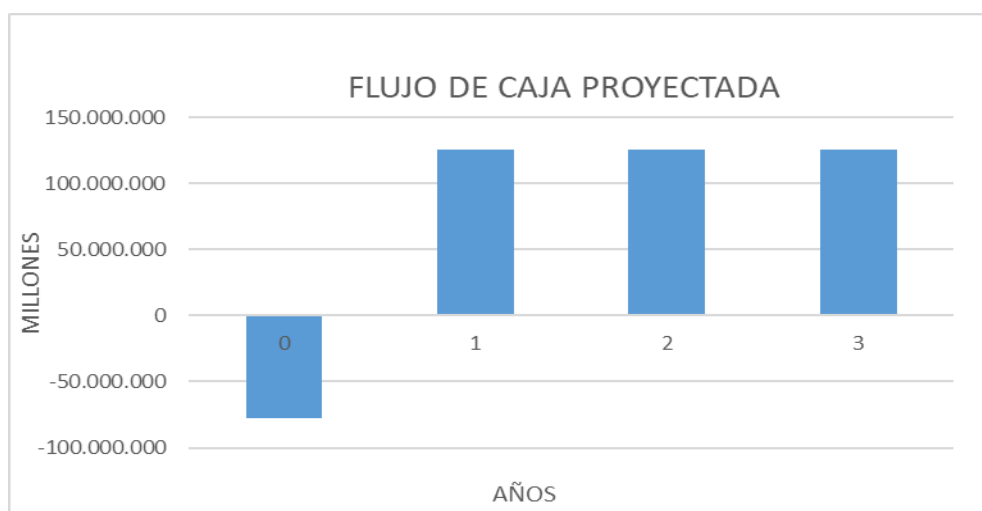


Figura 7.1: Grafico de flujo de caja proyectada.

7.12.3.2. Determinación de la tasa interna de rendimiento (TIR)

En base a lo obtenido en el flujo de caja proyectada se calcula la tasa interna de rendimiento, el cual se detalla en el Apéndice C 1.- Determinación del TIR, VPN y PRI, se obtuvo un TIR de 152%, con lo cual se tiene que la inversión es altamente rentable.

7.12.3.3. Determinación del valor presente neto (VPN)

Según la proyección también del flujo de caja se calcula el valor presente neto, lo cual representa los gastos y ahorros que se transforman en dinero equivalente en el presente, tomando una tasa de descuento del 12% para un periodo de 3 años se obtuvo un valor igual a 300.999.416 Gs, que según el criterio del VPN, para un valor mayor a cero, es aceptable la inversión.



Figura 7.2: Valor acumulado.

7.12.3.4. Determinación del periodo de recuperación de la inversión (PRI)

Una vez establecido estos valores se calcula el tiempo de recuperación de lo invertido, el cual representa el tiempo en el que se recupera la inversión realizada inicialmente y el periodo a partir del cual se empieza a ganar dinero. El Payback se produce cuando el flujo de caja es igual a cero.

Payback = Periodo en el cual se logra VAN = 0.

Obteniéndose un PRI = 5 meses, 12 días.

II. INGENIERÍA DE DISEÑO

CAPITULO 8

SITUACION ACTUAL DE CONDICIONES DE OPERACIÓN

8.1. Reconocimiento de las instalación y ubicación

La planta alcoholera de Petropar (Petróleos Paraguayos), está situada en la Ciudad de Mauricio José Troche departamento del Guaira.

Como empresa estratégica, da un oxígeno al pulmón económico de los departamentos 4º y 5º, siendo las zonas aledañas las más beneficiadas, cuenta con un aproximado de área de influencia de 1.800 cañeros censados y 10.000 hectáreas cultivadas. Cumpliendo un rol social de suma importancia para mantener una economía estable dentro de la gran cadena productiva de caña de azúcar en esta zona y colindantes como el Dpto de Caaguazú.

Esta planta comenzó a operar a partir de los años 1980 donde se produce alcohol absoluto a través del procesamiento la caña de azúcar cuya capacidad es de 1.560 toneladas en molienda de caña de azúcar y de 96.720 litros de alcohol en producción por día.

De esta manera la planta industrial necesita operar de manera continua para procesar toda la materia prima existe.

8.1.1. Procesos críticos de producción

Actualmente la línea de producción cuenta con tres puntos críticos que son accionados con motores eléctricos, estos sectores pertenecen a:

- Mesa Alimentadora.

- Caldera.
- Captación de Agua.

Los motores son máquinas indispensables en un proceso productivo estos necesitan de un seguimiento adecuado para no interrumpir la producción por fallas.

8.1.2. Fallas típicas en motores de la industria

En la actualidad se presentan fallas en estos motores interrumpiendo la producción de Alcohol. Los problemas más comunes que suelen presentarse durante la producción son las de:

- Calentamiento del motor.
- Calentamiento de las fases de alimentación.
- Problemas en los rodamientos.
- Desalineaciones.
- Problemas en bobinados.

Estas fallas generan pérdidas económicas considerables en la planta industrial actualmente solo en adquisición de rodamientos se gasta un promedio de 15.000 USD y de 16.159 USD en rebobinado de motores.

8.1.2.1. Comparativo horas de zafra y horas de parada

La siguiente tabla nos muestra un comparativo de horas zafra y las horas de parada durante dos años de producción. Un total de 1.933 hs de parada en el año 2016 y un total de 1.229 hs en el 2017 la que nos muestra las malas condiciones de operación de la industria.

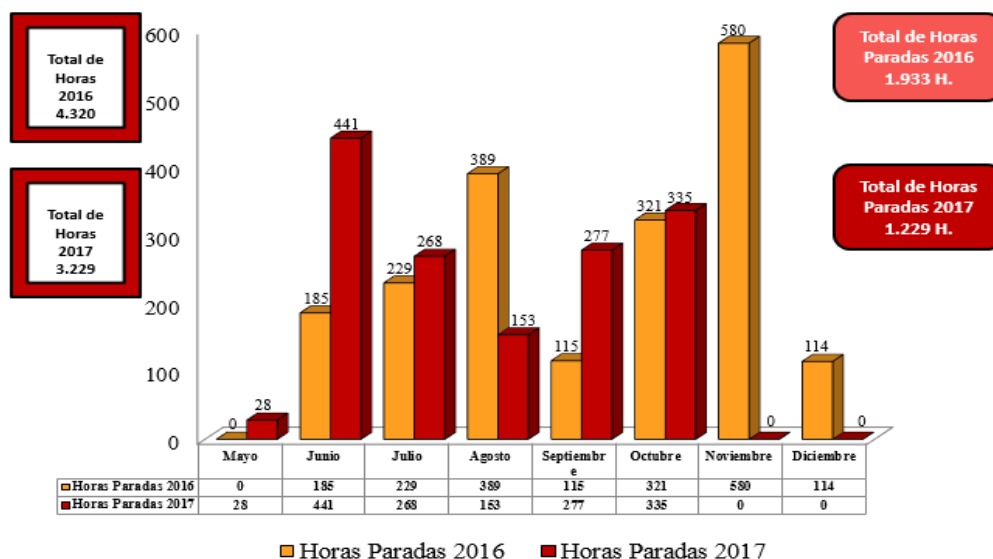


Figura 8.1: Comparativo horas de zafra vs horas de parada.

8.1.2.2. Técnicas de inspección de motores

El proceso de mantenimiento a estos motores son las siguientes:

- Cambio de rodamiento cada 6 meses.
- Lavado y secado.
- Prueba de aislación.

Con estas simples inspecciones operan los motores dando lugar a que se presenten fallas inesperadas, por falta de control y seguimiento adecuado.

La planta industrial no cuenta con proyectos ni estudios realizados para mejorar el servicio de estos, por la que se convierte en un problema continuo durante cada periodo de producción.

8.1.2.3. Tabla comparativa de tecnologías predictivas

TECNICAS DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO	FALLAS QUE PUEDE DETECTAR	FALLAS COMUNES EN LOS MOTORES
ANALISIS POR VIBRACIONES	<ul style="list-style-type: none"> • Desalineación 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Desalineación 2. Fallas en rodamientos 3. Problemas en el bobinado 4. Conexiones recalentadas 5. Calentamiento del motor
	<ul style="list-style-type: none"> • Desbalance 	
	<ul style="list-style-type: none"> • Roturas de barras del rotor 	
	<ul style="list-style-type: none"> • Solturas mecánicas 	
	<ul style="list-style-type: none"> • Rodamientos dañados 	
	<ul style="list-style-type: none"> • Cortocircuito en devanado del rotor 	
ANALISIS POR TERMOGRAFIA	<ul style="list-style-type: none"> • Conexiones recalentadas 	
	<ul style="list-style-type: none"> • Defectos de aislamiento 	
	<ul style="list-style-type: none"> • Problemas de lubricación 	
	<ul style="list-style-type: none"> • Errores de Alineación 	
	<ul style="list-style-type: none"> • Motores recalentados 	
	<ul style="list-style-type: none"> • Rodamientos calientes 	

Tabla 8.1: Comparativo vibraciones y termografía.

8.2. Propuesta de inspección predictiva

Mediante la tabla comparativa de las fallas que son posibles de percibir con las tecnologías de inspección por termografía y vibraciones comparando con las fallas típicas de los sectores en estudio nos muestra que las dos

inspecciones son aplicables, por consiguiente, se propone implementar estas tecnologías.

- Inspección térmica.
- Análisis por vibraciones.

8.3. Análisis por vibraciones

8.3.1. Alcance de la inspección

El presente análisis cubre los servicios de inspección de los motores en los procesos críticos de la industria.

Los sectores y motores inspeccionados son las siguientes:

- Análisis Vibracional al motor 1 Exhaustor Izquierdo – Sector Caldera.
- Análisis Vibracional al motor 2 Exhaustor Derecho – Sector Caldera.
- Análisis Vibracional al motor 1 – Sector Captación.
- Análisis Vibracional al motor 2 – Sector Captación.
- Análisis Vibracional al motor 4 – Sector Captación.
- Análisis Vibracional al motor 5 – Sector Captación.

Observación: La inspección al motor 3 no se pudo realizar por estar en proceso de reparación debido a una falla.

La inspección realizada en la Alcoholera de Mauricio José Troche, en el cual se presenta el diagnóstico real de estado de condición de los motores eléctricos y sus elementos rodantes, descrito en el presente informe.

8.3.2. Método de colecta de datos

Para la colecta de datos de vibraciones de los motores eléctricos se utilizó el siguiente instrumento:

Los analizadores Microlog CMXA-75-GX son unos colectores de datos /analizadores FFT portátiles de alto rendimiento, desde uno a tres canales, y basados en ruta que proporcionan una versatilidad y funcionalidad sin igual con un diseño industrial y robusto. Desarrollado para usarlo en una gran variedad de industrias.



Figura 8.2: Analizador de vibraciones.

8.3.3. Criterios de alarma y severidad

Los valores de alarma para la severidad de vibración en Velocidad RMS fueron tomados de acuerdo a la norma ISO 10816 a lo especificado, para el caso de equipos sin historial (No transportadores).

Valor de Alerta: 4.5 mm/seg

Valor de Parada: 7.1-11 mm/seg

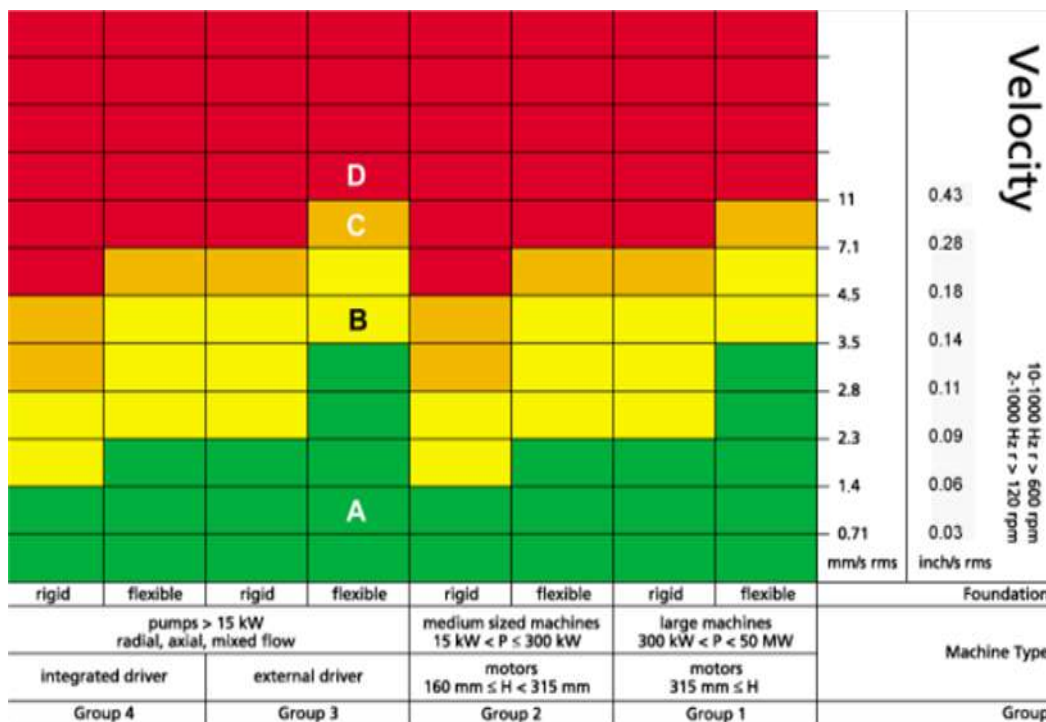


Tabla 8.2: Severidad de vibraciones criterio norma ISO 10816, para el caso de equipos sin historial (No transportadores).

8.3.4. Implicancia de niveles de alarmas

SKF Reliability Systems		SKF
<i>Implicancia de los Niveles de Alarmas</i>		
Se describe a continuación la implicancia de los distintos niveles de alarmas utilizados para la confección de los reportes de diagnósticos del estado de condición de los equipos bajo control.		
Bueno	<p>El estado de condición del equipo es considerado confiable. No requiere tomar acciones de mantenimiento.</p> <p>El reporte puede contener alguna descripción o comentario respecto a su funcionamiento o mantenimiento con el fin de registrar algún evento que no afecta a la confiabilidad mecánica ni operacional del equipo.</p> <p>Los niveles vibratorios son aceptables, no evidencian cambios importantes en el tiempo, permiten la operación del equipo en condiciones normales de marcha hasta la próxima medición.</p>	
Satisfactorio	<p>El estado de condición del equipo no se considera bueno. Implica tomar acciones proactivas, correctivas o de seguimiento, las cuales están enfocadas a mejorar la confiabilidad mecánica u operacional del equipo, incrementar la vida útil o la predictibilidad.</p> <p>Los equipos en esta categoría implican que se ha identificado una falla incipiente, o se sospecha que puede haber una falla que no esta claramente identificada y se requieren mediciones adicionales para definir con claridad el problema y su severidad.</p> <p>Este estado no es de alta criticidad, pero es importante destacar que mediante este nivel de alarma pueden informarse mejoras a realiza sobre el equipo.</p> <p>El estado de condición del equipo puede ser mejorado.</p>	
Alerta	<p>El estado de condición del equipo es de aviso de "alerta" lo que significa baja confiabilidad mecánica u operativa.</p> <p>Existe alto riesgo de falla. Implica tomar acciones correctivas para reparar o mejorar una situación de baja confiabilidad.</p> <p>La urgencia es mediano plazo, generalmente se estima que puede trabajar el equipo hasta la siguiente medición aunque esto no se pueda garantizar.</p> <p>Este nivel de alarma informa falla declarada o síntoma de problema declarado.</p> <p>El estado de condición del equipo debe ser mejorado.</p>	
Emergencia	<p>El estado de condición del equipo es crítico en lo que respecta a su confiabilidad mecánica u operativa.</p> <p>Existe muy alto riesgo de falla o colapso inminente. Requiere tomar acciones correctivas urgentes para reparar la falla.</p> <p>La urgencia de la corrección del problema es a corto plazo, dentro de la semana de aviso o aún con mayor anticipación.</p> <p>Este nivel de alarma es utilizado para informar problemas severos a corregir a la brevedad.</p> <p>El estado de condición del equipo debe ser corregido con urgencia.</p>	

Tabla 8.3: Niveles de alarmas.

8.4. Inspección térmica

8.4.1. Alcance de la inspección

El presente análisis consiste en inspección de los motores y tableros en los procesos críticos de la industria.

Los sectores y motores inspeccionados son las siguientes:

- Análisis térmico al (motor, Tablero) – Mesa Alimentadora.
- Análisis térmico al (motor 1 Izquierdo, Tablero) – Sector Caldera.
- Análisis térmico al (motor 2 Derecho, Tablero) – Sector Caldera.
- Análisis térmico al (motor 1, Tablero) – Sector Captación.
- Análisis térmico al (motor 2, Tablero) – Sector Captación.
- Análisis térmico al (motor 4, Tablero) – Sector Captación.
- Análisis térmico al (motor 5, Tablero) – Sector Captación.

Observación: La inspección al motor 3 no se pudo realizar por estar en proceso de reparación debido a una falla.

La inspección realizada en la Alcoholera de Mauricio José Troche, en el cual se presenta el diagnostico real de estado y condición de temperatura de los motores, contactos y las fases de alimentación, descrito en el presente informe.

8.4.2. Método de colecta de datos

Para la colecta de datos de temperatura de los motores y tableros eléctricos se utilizó el siguiente instrumento:

8.4.2.1. Cámara termográfica Ti125

Esta cámara termográfica infrarroja cuenta con rango de temperatura de -20 a 350 °C con tecnología IR-Fusión y función de notas de voz, la precisión en la medida es de ± 2 °C, la sensibilidad del equipo es de 0.10 °C y la resolución térmica es de 160 x 120 pixeles; cuenta con grabación de video, un instrumento de medición muy compacto muy intuitivo a la hora de manipular.



Figura 8.3: Cámara termográfica.

8.4.2.2. Software de análisis SmartView

El software SmartView tiene funciones para analizar imágenes, organizar los datos la información y generar informes de pruebas.

Esto incluye opciones de configuración para el cálculo y la visualización de datos de medición de temperatura radiométrica relacionados con las imágenes

térmicas. Estas opciones incluyen el Intervalo (el ajuste automático y manual del nivel y el alcance), la Emisividad, el Fondo, la Transmisión, los Puntos térmicos, los Marcadores y el Cuadro central.

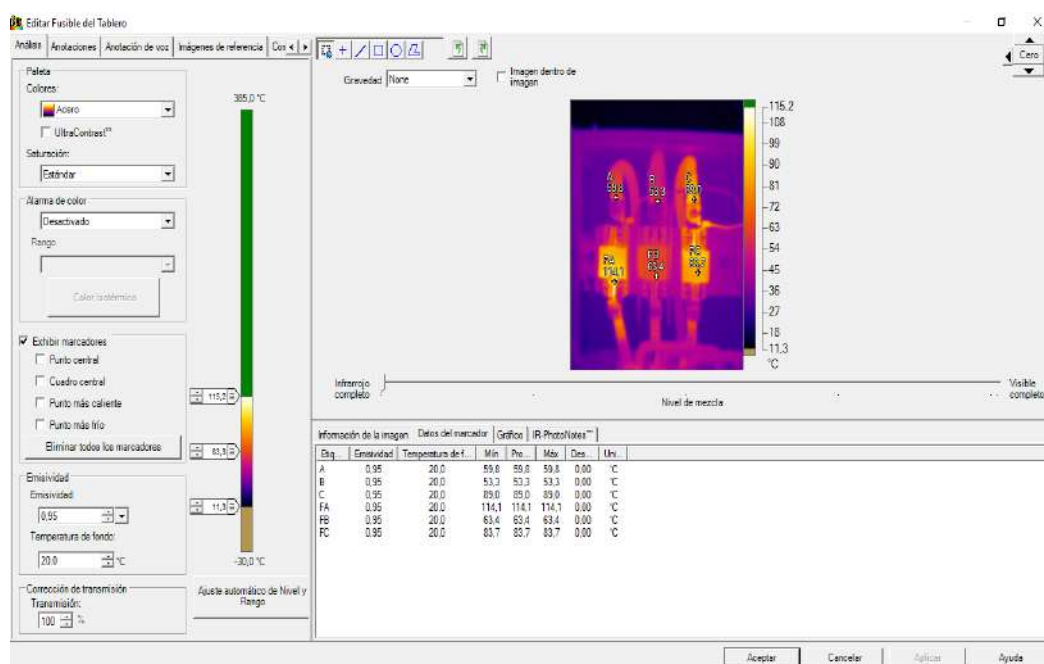


Figura 8.4: Software de análisis SmartView.

8.4.3. Criterio de alarma y severidad

Los valores de alarma para la severidad de temperatura fueron tomados de acuerdo a la norma NETA (InterNational Electrical Testing Association) a lo especificado, para el caso de equipos sin historial (No transportadores).

Relevancia	Prioridad	Incremento de temperatura ΔT (°C)	Observación
NORMAL	1 (bajo)	$1^{\circ}\text{C} < \Delta T \leq 3^{\circ}\text{C}$ (O/S) $1^{\circ}\text{C} < \Delta T \leq 10^{\circ}\text{C}$ (O/A)	No es necesaria ninguna actuación hasta el próximo estudio predictivo.
LEVE	2	$3^{\circ}\text{C} < \Delta T \leq 15^{\circ}\text{C}$ (O/S) $10^{\circ}\text{C} < \Delta T \leq 20^{\circ}\text{C}$ (O/A)	Realizar un seguimiento para ver la evolución del punto caliente o crítico usando la metodología y el personal más adecuado.
GRAVE	3	$15^{\circ}\text{C} < \Delta T \leq 25^{\circ}\text{C}$ (O/S) $20^{\circ}\text{C} < \Delta T \leq 30^{\circ}\text{C}$ (O/A)	Actuar lo antes posible teniendo en cuenta la dinámica de cada empresa y sus turnos de trabajo, se deberá aprovechar el paro más inmediato para corregir el problema.
CRÍTICO	4	$25^{\circ}\text{C} < \Delta T \leq 35^{\circ}\text{C}$ (O/S) $30^{\circ}\text{C} < \Delta T \leq 40^{\circ}\text{C}$ (O/A)	Estudiar la posibilidad de parar el proceso para corregir el problema.
MUY CRÍTICO	5 (alto)	$\Delta T > 35^{\circ}\text{C}$ (O/S) $\Delta T > 40^{\circ}\text{C}$ (O/A)	Interrumpir el proceso de inmediato para corregir el problema.

(O/S) = Temperatura sobre similar (O/A) = Temperatura sobre ambiente

Tabla 8.4: Rangos de severidad de anomalías térmicas según la norma NETA (InterNational Electrical Testing Association) a lo especificado, para el caso de equipos sin historial (No transportadores).

Esta tabla indica los niveles de severidad de las elevaciones de temperatura de los motores, conductores y contactos fundamental al realizar las conclusiones de cada inspección y análisis de temperaturas de condición.

8.5. Informe del análisis por vibraciones

INFORME DE ANALISIS VIBRACIONAL MOTORES ELECTRICOS



Petropar –Paraguay

8.5.1. Exhaustor izquierdo


Para	Petropar MJT	Reporte N°: 01	Fecha	30/07/2019
Planta	Alcoholera			
Diagrama Típico:		Equipo	Motor 1	
		Sector	Caldera	
		RPM	2970 RPM	
		Potencia	350 HP	
		Referencia	Motor eléctrico acoplado a ventilador por correa.	

Tabla 8.5: Característica motor exhaustor izquierdo.

VALOR GLOBAL	CONDICION
4,17 mm/s rms	BUENO

Diagnóstico: No se observa anormalidades en la energía del espectro.

Según criterio de la norma ISO 10816 es aceptable.

Recomendaciones:

Hacer un seguimiento al equipo.

8.5.1.1. Espectro en frecuencia 0-1000 Hz

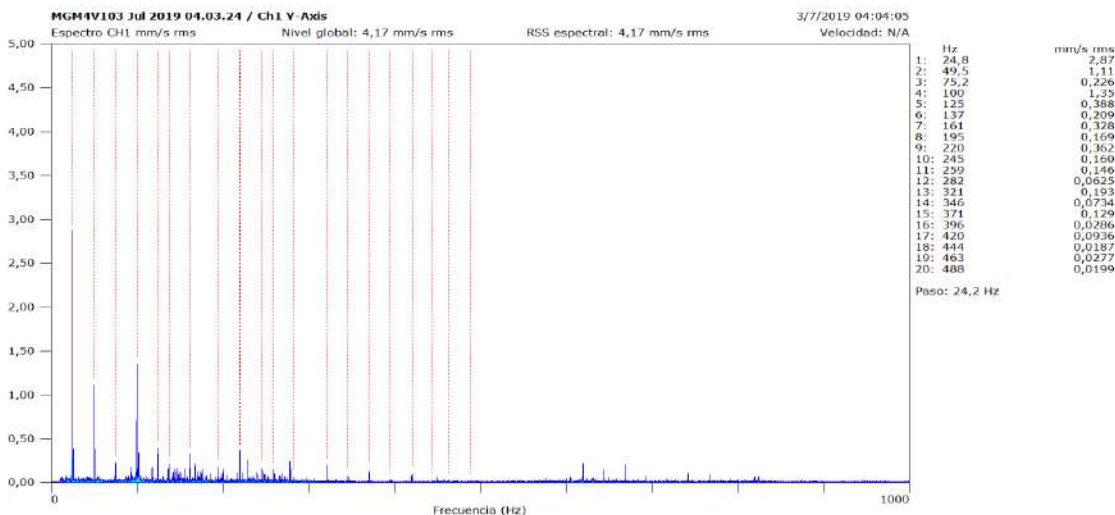


Figura 8.5: Vista general de espectro Motor –Exhaustor izquierdo.

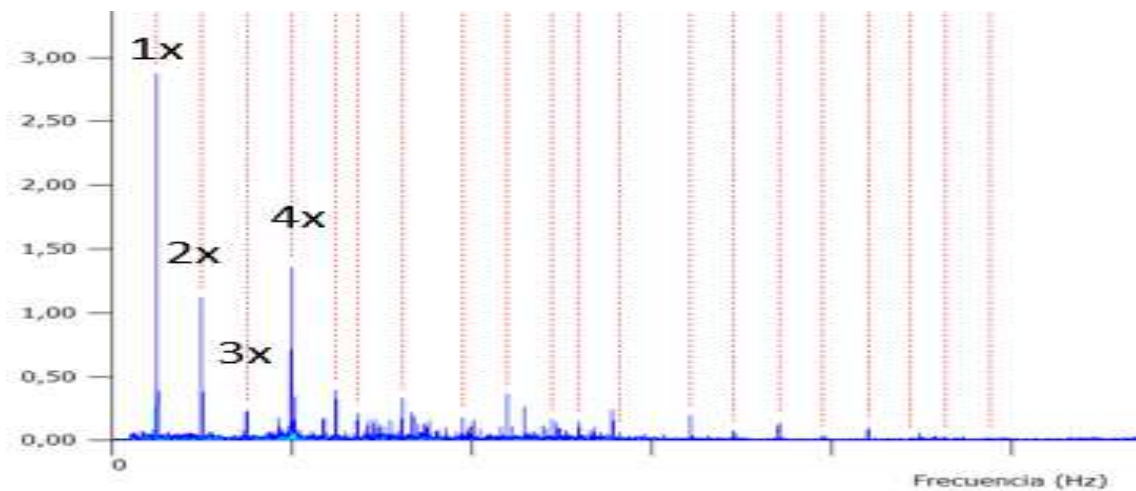


Figura 8.6: Vista ampliada en zona de análisis Motor - Exhaustor izquierdo.

8.5.2. Exhaustor derecho


Para	Petropar MJT	Reporte N°: 01	Fecha	30/07/2019
Planta	Alcoholera			
Diagrama Típico:		Equipo	Motor 2	
		Sector	Caldera	
		RPM	2970 RPM	
		Potencia	350 HP	
		Referencia	Motor eléctrico acoplado a ventilador por correa.	

Tabla 8.6: Característica motor exhaustor derecho.

VALOR GLOBAL	CONDICION
5,37 mm/s rms	ALERTA

Diagnóstico: Los niveles de vibraciones se encuentran en nivel de alerta según la norma ISO 10816-2.

Recomendaciones:

Verificar el estado y alineación de las correas.

8.5.2.1. Espectro en frecuencia 0-1000 Hz

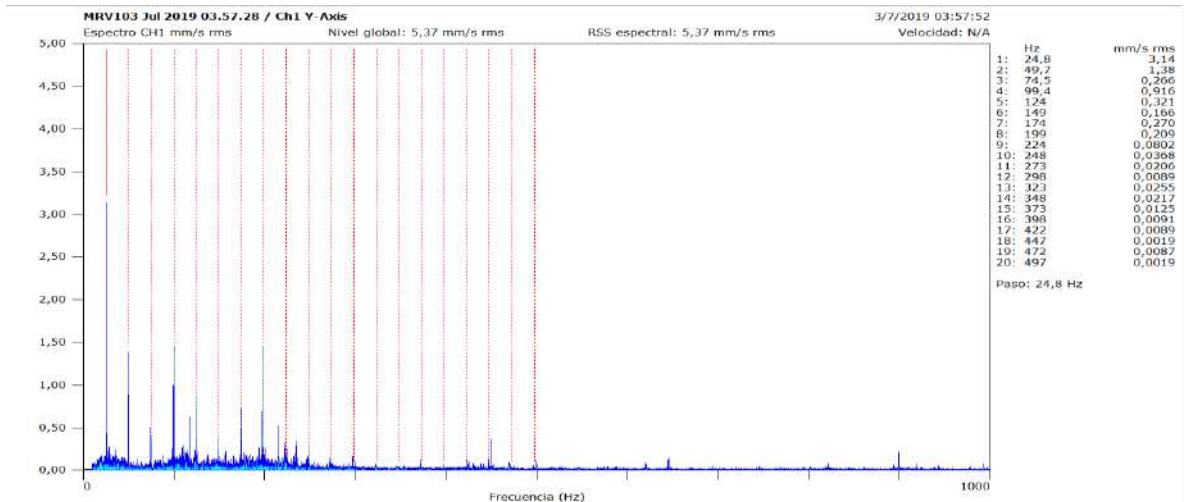


Figura 8.7: Vista general de espectro Motor -Exhaustor derecho.

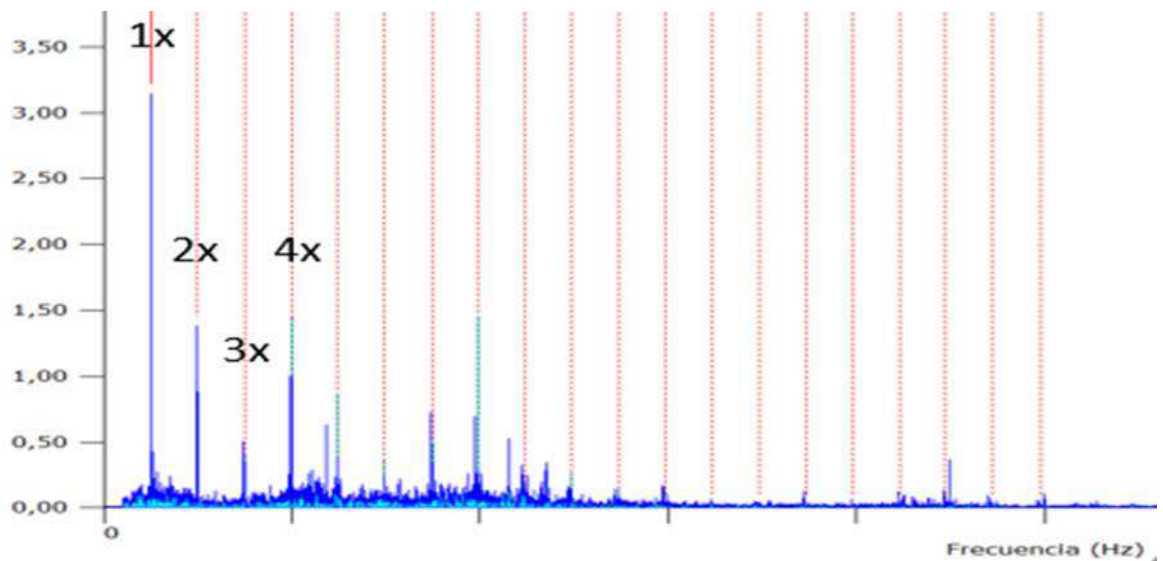


Figura 8.8: Vista ampliada en zona de análisis Motor - Exhaustor derecho.

8.5.3. Captación de agua motor 1


Para	Petropar MJT	Reporte N°: 01	Fecha	30/07/2019
Planta	Alcoholera			
Diagrama Típico:		Equipo	Motor 1	
		Sector	Captación de Agua	
		RPM	1485 RPM	
		Potencia	250 HP	
		Referencia	Motor eléctrico acoplado a bomba de agua.	

Tabla 8.7: Característica motor 1 captación de agua.

VALOR GLOBAL	CONDICION
8,21 mm/s rms	ALERTA

Diagnóstico: Alto niveles de vibraciones radiales a causa de desalineación en el eje de transmisión Motor-Bomba.

Según la Norma ISO 10816 el motor se encuentra se encuentra trabajando fuera de los parámetros de tolerancia, con un nivel global de 8 mm/s.

Recomendaciones:

Alinear EJE Motor-Reductor y modificar manchón de acople.

8.5.3.1. Espectro en frecuencia 0-1000 Hz

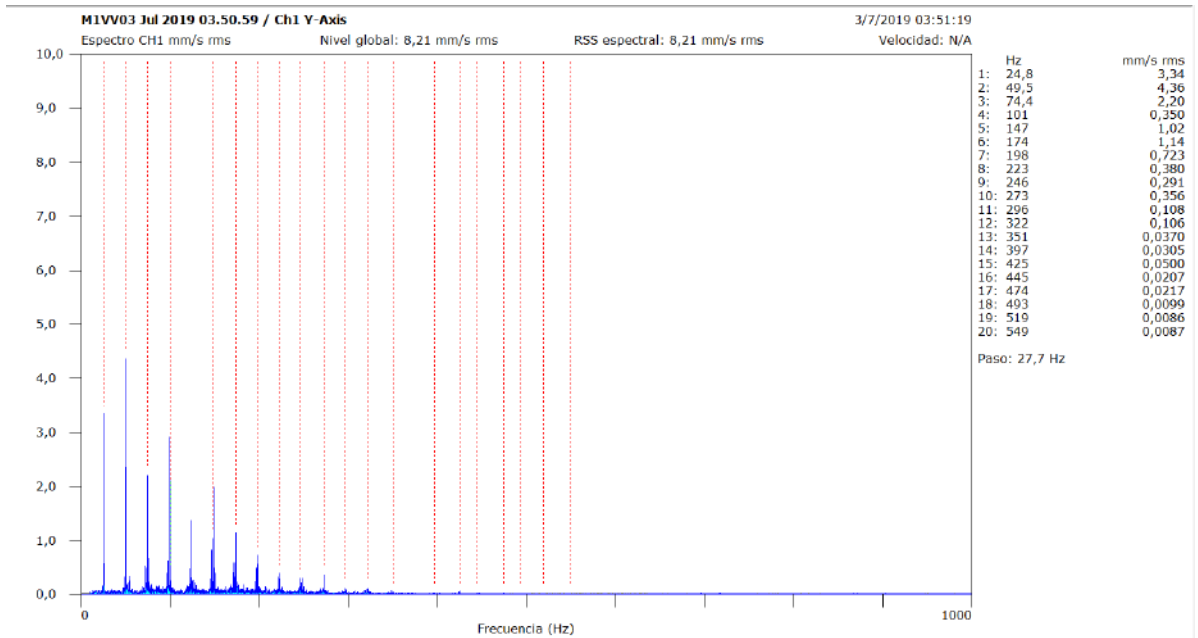


Figura 8.9: Vista general de espectro Motor bomba 1 – Captación.

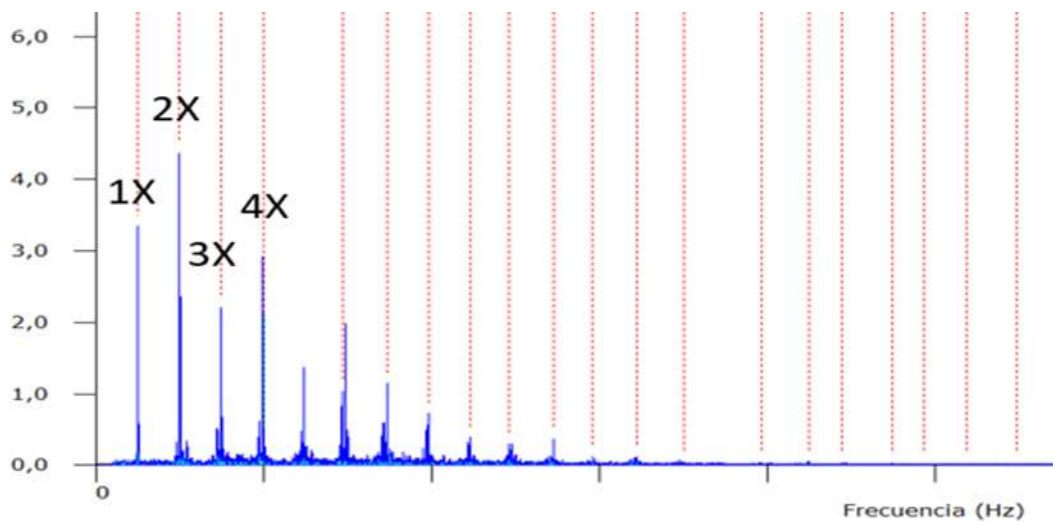


Figura 8.10: Vista ampliada en zona de análisis Motor bomba 1 – Captación

8.5.4. Captación de agua motor 2


Para	Petropar MJT	Reporte N°: 01	Fecha	30/07/2019
Planta	Alcoholera			
Diagrama Típico:		Equipo	Motor 2	
		Sector	Captación de Agua	
		RPM	1485 RPM	
		Potencia	250 HP	
		Referencia	Motor eléctrico acoplado a bomba de agua.	

Tabla 8.8: Característica motor 2 captación de agua.

VALOR GLOBAL	CONDICION
1,24 mm/s rms	BUENO

Diagnóstico: Los niveles de vibraciones están dentro del parámetros de funcionamiento según la Norma ISO 10816.

Recomendaciones:

Seguimiento periódico de vibraciones al motor.

8.5.4.1. Espectro en frecuencia 0-1000 Hz

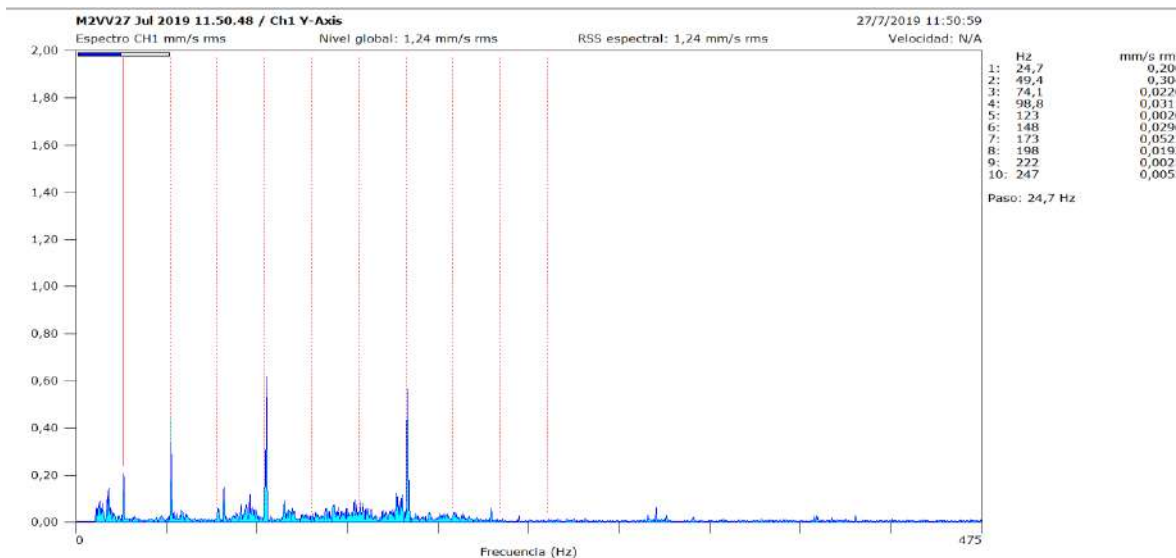


Figura 8.11: Vista general de espectro Motor bomba 2 – Captación.

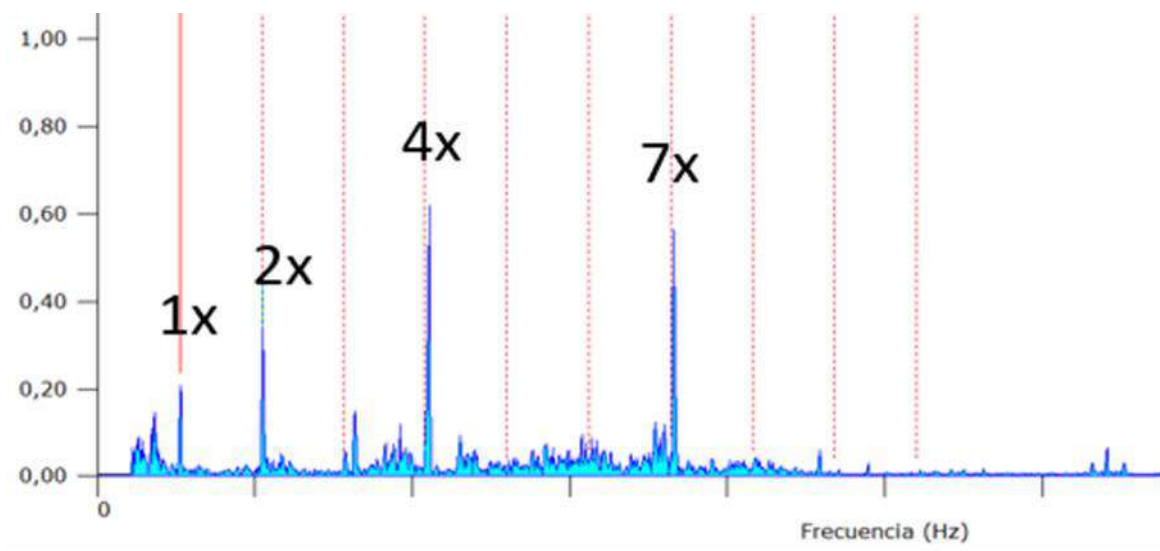


Figura 8.12: Vista ampliada en zona de análisis Motor bomba 2 – Captación.

8.5.5. Captación de agua motor 4

Para	Petropar MJT	Reporte N°: 01	Fecha	30/07/2019
Planta	Alcoholera			
Diagrama Típico:		Equipo	Motor 4	
		Sector	Captación de agua	
		RPM	1485 RPM	
		Potencia	250 HP	
		Referencia	Motor eléctrico acoplado a bomba de agua.	

Tabla 8.9: Característica motor 4 captación de agua.

VALOR GLOBAL	CONDICION
16,6 mm/s rms	ALERTA

Diagnóstico: Se observa un nivel muy alto en el espectro en 1x a causa de un problema en la chaveta que ocasiona un desbalanceo estático en el eje del motor

El nivel de Vibración según la norma ISO 10816 se encuentra fuera de tolerancia.

Recomendaciones:

Intervenir el motor para reparación.

8.5.5.1. Espectro en frecuencia 0-1000 Hz

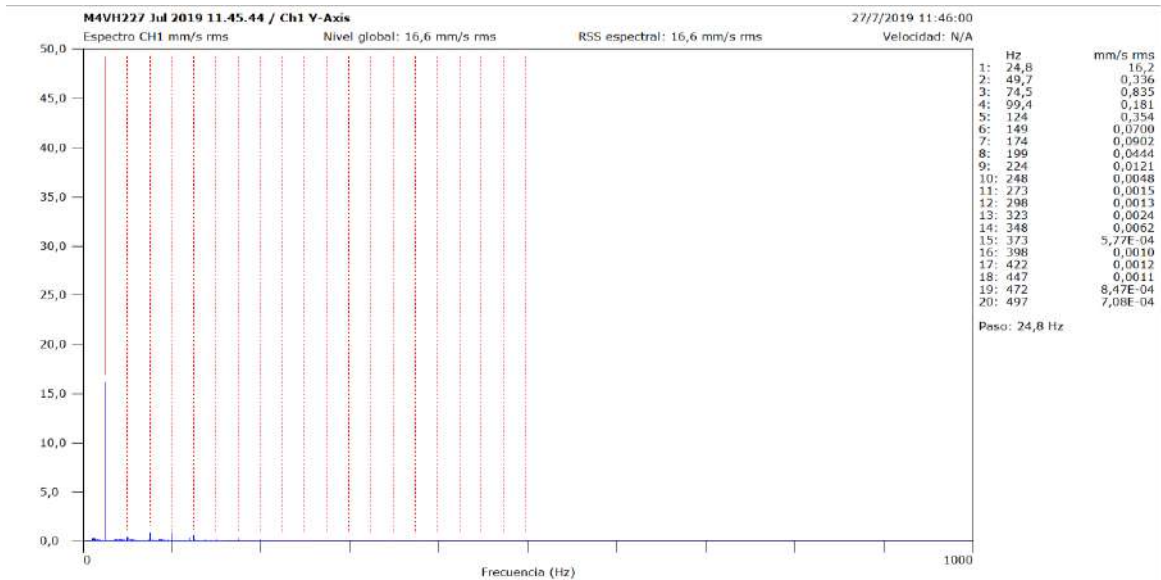


Figura 8.13: Vista general de espectro Motor bomba 4 – Captación.

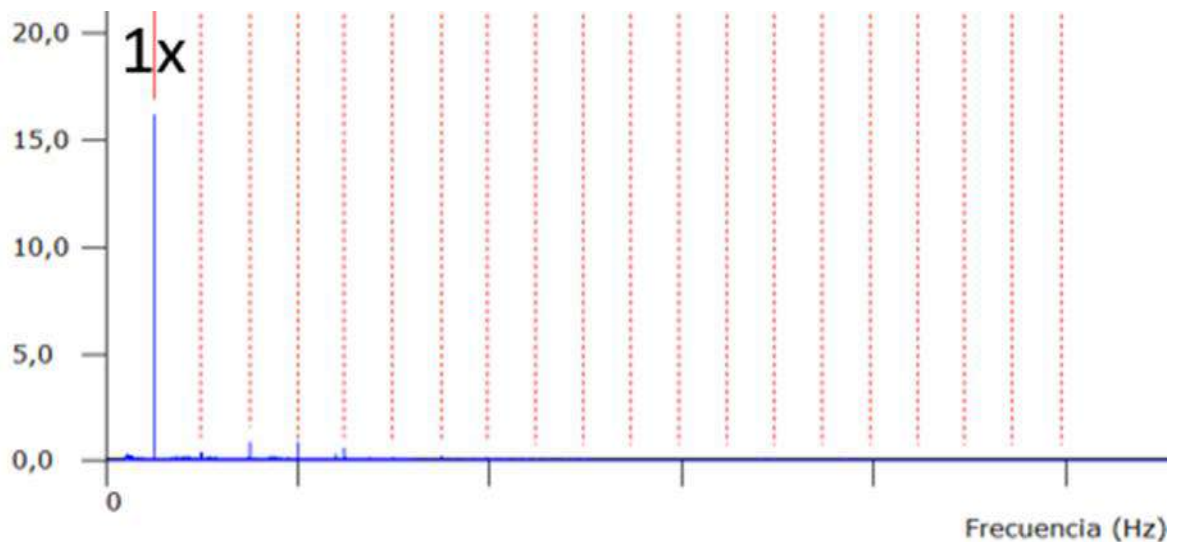


Figura 8.14: Vista ampliada en zona de análisis Motor bomba 4 – Captación.

8.5.6. Captación de agua motor 5


Papa	Petropar MJT	Reporte N°: 01	Fecha	30/07/2019
Planta	Alcoholera			
Diagrama Típico:		Equipo	Motor 5	
		Sector	Captación de agua	
		RPM	1480 RPM	
		Potencia	150 HP	
		Referencia	Motor eléctrico acoplado a bomba de agua.	

Tabla 8.10: Característica motor 5 captación de agua.

VALOR GLOBAL	CONDICION
8,32 mm/s rms	ALERTA

<p>Diagnóstico: Se observa un nivel muy alto en el espectro en 1x a causa de un problema en el acople que ocasiona un desbalanceo estático en el eje del motor</p> <p>El nivel de Vibración según la norma ISO 10816 se encuentra fuera de tolerancia.</p> <p>Recomendaciones:</p> <p>Intervenir el motor para reparar el acople.</p>

8.5.6.1. Espectro en frecuencia 0-1000 Hz

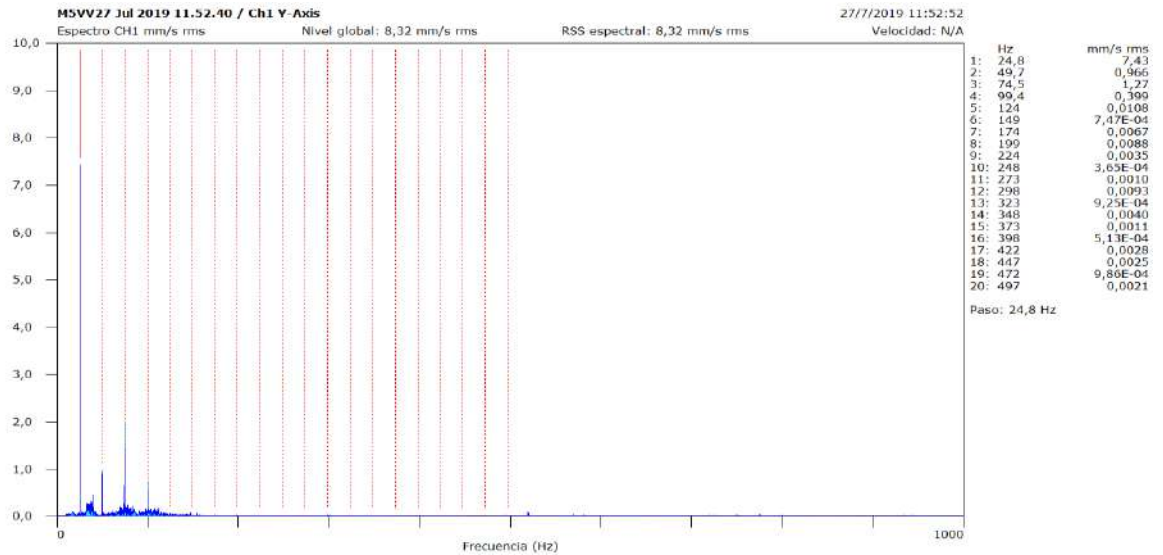


Figura 8.15: Vista general de espectro Motor bomba 5 – Captación.

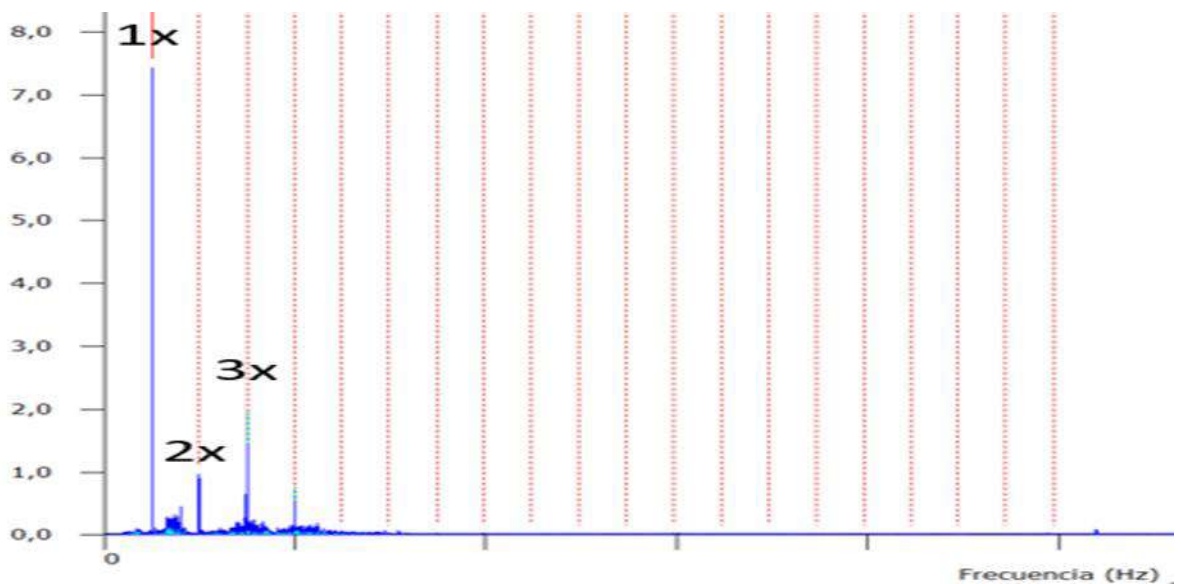


Figura 8.16: Vista ampliada en zona de análisis Motor bomba 5 – Captación.

8.6. Informe inspección por termografía

INSPECCION TERMICA

Preparado para:

PETROPAR - PLANTA ALCOHOLERA

Petropar - Paraguay

123

8.6.1. Mesa alimentadora

8.6.1.1. Motor mesa alimentadora

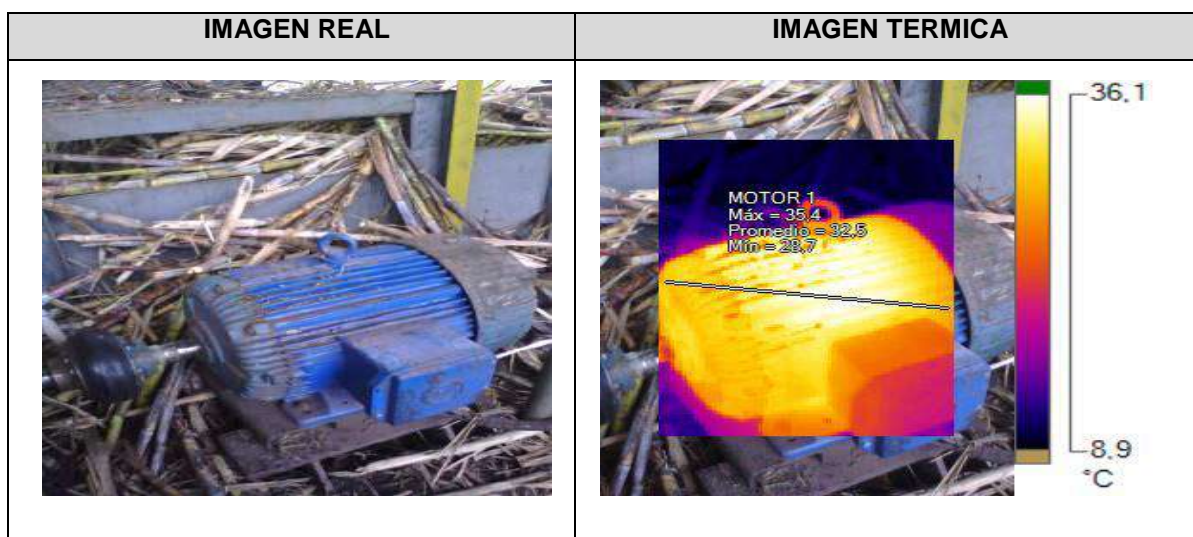


Figura 8.17: Imagen real y térmica del motor sector mesa alimentadora.

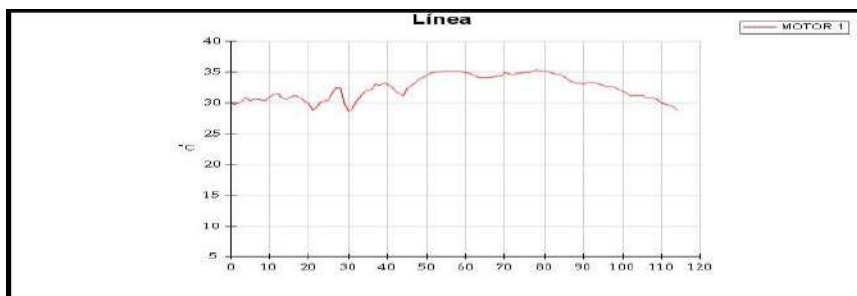


Figura 8.18: Variación de temperatura del motor mesa alimentadora.

TEMPERATURAS						
Nombre	Promedio	Mín	Máx	Emisividad	Segundo plano	Desviación Estándar
Motor 1	32,5°C	28,7°C	35,4°C	0,95	15°C	1,96

Tabla 8.11: Temperatura del motor mesa alimentadora.

8.6.1.1.1. Resumen de la imagen térmica

El motor presenta una temperatura promedio de 32,5°C lo cual nos indica que está operando en condiciones normales de funcionamiento y no presenta elevaciones de temperatura.

Sugerencia: Seguir tendencia trimestral de las variables.

8.6.1.2. Tablero motor mesa alimentadora

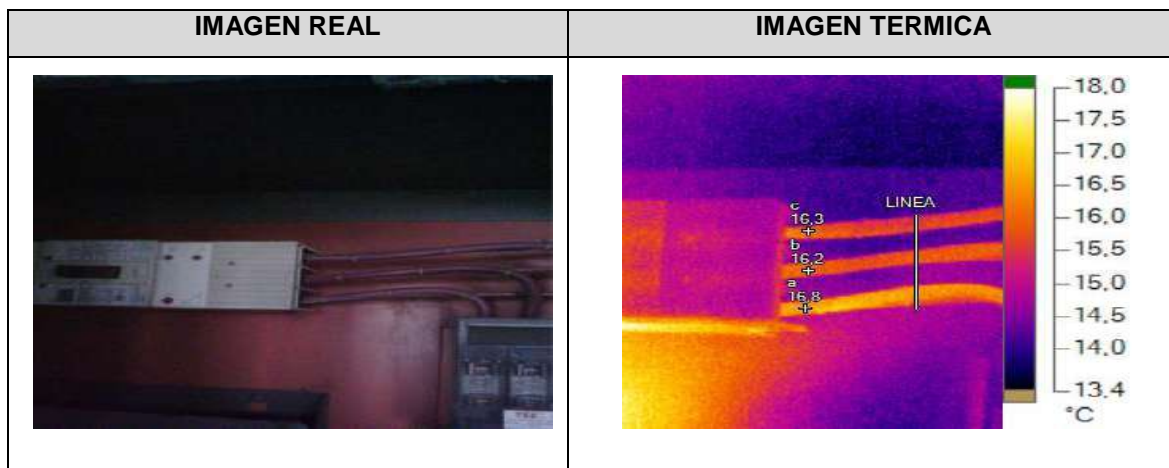


Figura 8.19: Imagen real y termica conductor tablero mesa alimentadora.

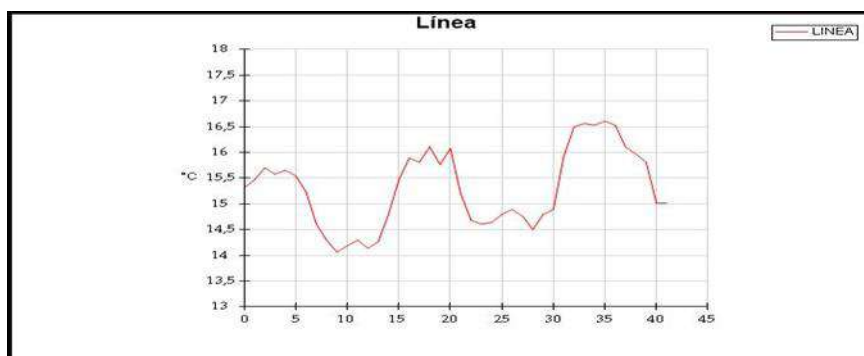


Figura 8.20: Variación de temperatura del conductor tablero mesa alimentadora.

TEMPERATURAS						
Nombre	Promedio	Mín	Máx	Emisividad	Segundo plano	Desviación estándar
Linea	15,3°C	14,1°C	16,6°C	0,95	13,4°C	2,5

TEMPERATURAS			
Nombre	Temperatura	Emisividad	Segundo plano
a	16,8°C	0,95	13,4°C
b	16,2°C	0,95	13,4°C
c	16,3°C	0,95	13,4°C

Tabla 8.12: Temperaturas del conductor en tablero mesa alimentadora.

ANALISIS	
Temperatura referencia	13,4°C
ΔT	3,4°C
Prioridad	1
Relevancia	NORMAL

Tabla 8.13: Análisis de temperatura tablero mesa alimentadora.

Los criterios de severidad empleados para el análisis de las anomalías térmicas en este informe es el sugerido por NETA (InterNational Electrical Testing Association) en su Maintenance Testing Esprcifications.

8.6.1.2.1. Resumen de la imagen térmica

En estos puntos similares al anterior los conductores del tablero no presentan elevaciones de temperatura. Según criterio de severidad de la norma NETA opera en condiciones normales presentando un nivel de prioridad 1.

Sugerencia: Seguir tendencia trimestral de las variables.

8.6.2. Exhaustor izquierdo

8.6.2.1. Motor exhaustor izquierdo

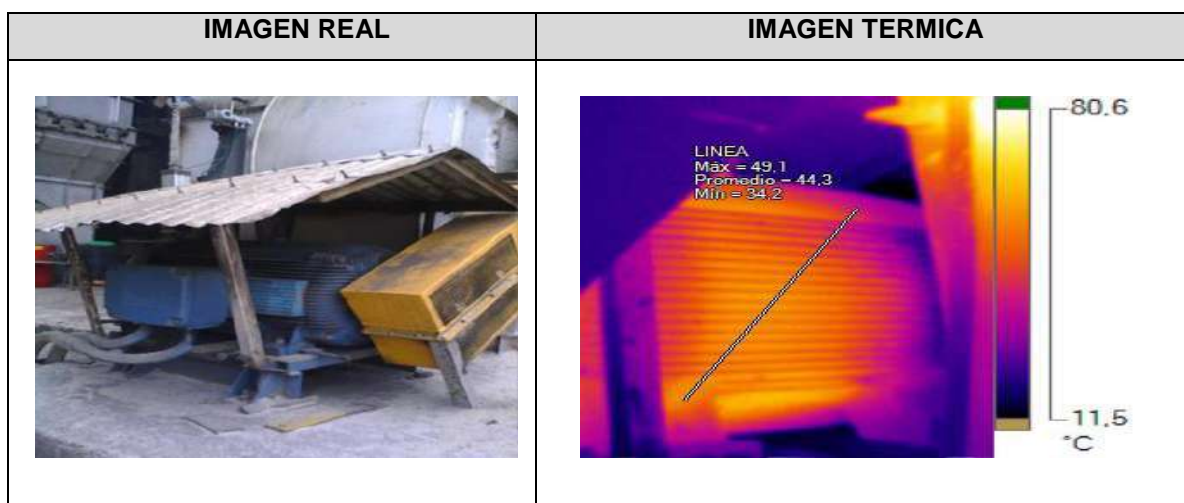


Figura 8.21: Imagen real y térmica del motor exhaustor izquierdo.

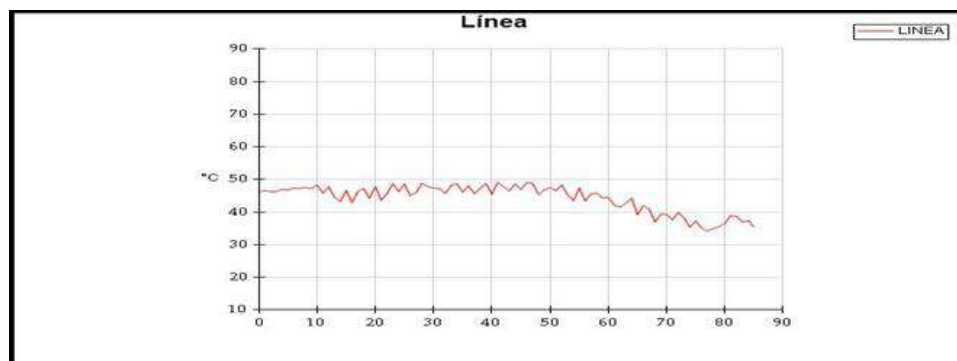


Figura 8.22: Variación de temperatura motor exhaustor izquierdo.

TEMPERATURAS						
Nombre	Promedio	Mín	Máx	Emisividad	Segundo plano	Desviación Estándar
Línea	44,3°C	34,4°C	49,1°C	0,95	12 °C	4,26

Tabla 8.14: Temperatura del motor exhaustor izquierdo.

8.6.2.1.1. Resumen de la imagen térmica

El motor exhaustor izquierdo presenta una temperatura promedio de 44,3°C el cual está expuesto a temperaturas elevadas de funcionamiento por su ubicación a lado mismo de la caldera. En condiciones generales no presenta elevaciones de temperatura considerable.

Sugerencia: Seguir tendencia trimestral de las variables.

8.6.2.2. Tablero exhaustor izquierdo

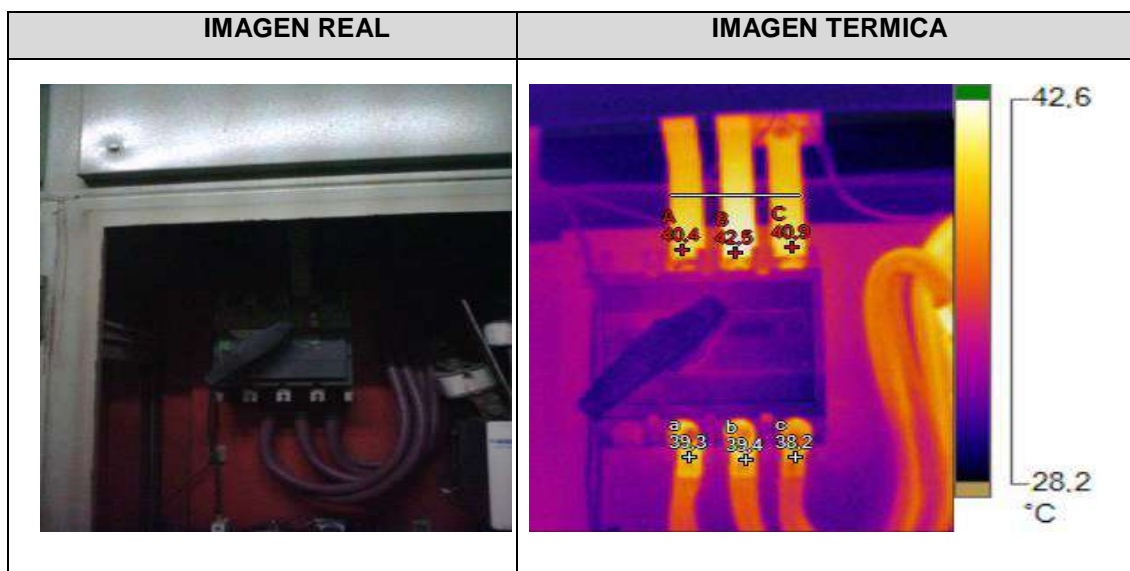


Figura 8.23: Imagen real y termica conductor tablero exhaustor izquierdo.

TEMPERATURAS						
Nombre	Promedio	Mín	Máx	Emisividad	Segundo plano	Desviación estándar
Linea	37,4°C	30,7°C	40,8°C	0,95	28,2°C	3,58

TEMPERATURAS			
Nombre	Temperatura	Emisividad	Segundo plano
A	40,4°C	0,95	28,2°C
B	42,5°C	0,95	28,2°C
C	40,9°C	0,95	28,2°C
a	39,3°C	0,95	28,2°C
b	39,4°C	0,95	28,2°C
c	38,2°C	0,95	28,2°C

Tabla 8.15: Temperatura del conductor tablero exhaustor izquierdo.

ANALISIS

Temperatura referencia	28,2 °C
ΔT	14,3°C
Prioridad	2
Relevancia	LEVE

Tabla 8.16: Análisis de temperatura tablero exhaustor izquierdo.

Los criterios de severidad empleados para el análisis de las anomalías térmicas en este informe es el sugerido por NETA (InterNational Electrical Testing Association) en su Maintenance Testing Esprcifications.

8.6.2.2.1. Resumen de la imagen térmica

El tablero del exhaustor izquierdo indica que los conductores y contactos del interruptor presentan una elevación de temperatura ΔT de 14,3°C. Según criterio de severidad de la norma NETA presentando un nivel de prioridad 2, se observa que todos los conductores y contactos tienen temperaturas similares alrededor de los 40°C.

Los contactos no presentan puntos calientes y los conductores no tienen muy altas temperaturas, está operando en condiciones normales

Sugerencia: Seguir tendencia trimestral de las variables.



Figura 8.24: Imagen real y termica conductor fusible y contactos exhaustor izquierdo.

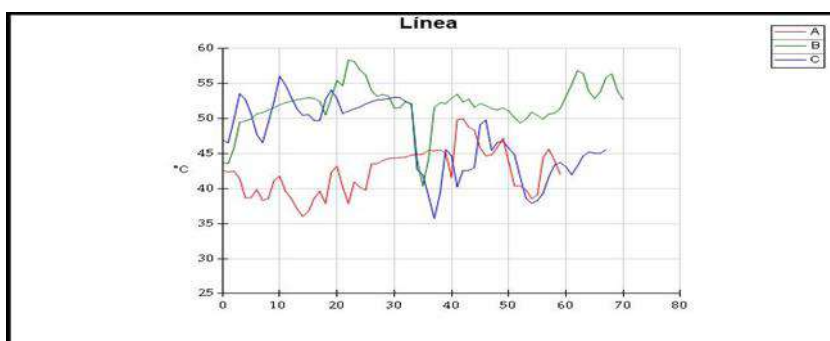


Figura 8.25: Variación de temperatura fusible y contacto exhaustor izquierdo.

TEMPERATURAS						
Nombre	Promedio	Mín	Máx	Emisividad	Segundo plano	Desviación estándar
A	42,4°C	36,0°C	50,0°C	0,95	27,8°C	3,33
B	51,9°C	40,4°C	58,4°C	0,95	27,8°C	3,26
C	47,3°C	35,8°C	56,1°C	0,95	27,8°C	5,05

Tabla 8.17: Temperatura conductor fusible y contactos exhaustor izquierdo.

ANALISIS

Temperatura Referencia	27,8°C
ΔT fase B	24°C
Prioridad	3
Relevancia	ALARMA

Tabla 8.18: Análisis de temperatura fusible y contactos tablero exhaustor izquierdo.

Los criterios de severidad empleados para el análisis de las anomalías térmicas en este informe es el sugerido por NETA (InterNational Electrical Testing Association) en su Maintenance Testing Esprcifications.

8.6.2.2.2. Resumen de la imagen térmica

Los fusibles y contactos presentan elevadas temperaturas principalmente el de la fase B con un promedio de temperatura de 51,9°C y un ΔT de 24°C. Según criterio de severidad de la norma NETA presentando un nivel de prioridad 3, las fases B y C presentan mayores temperaturas que el de la fase A las que nos indica puntos y conductores más calientes en B y C.

Sugerencia: Realizar una parada programada en las próximas 4 semanas para realizar los ajustes el reapriete de bornes y verificación de corrientes de fases.

8.6.3. Exhaustor derecho

8.6.3.1. Motor exhaustor derecho

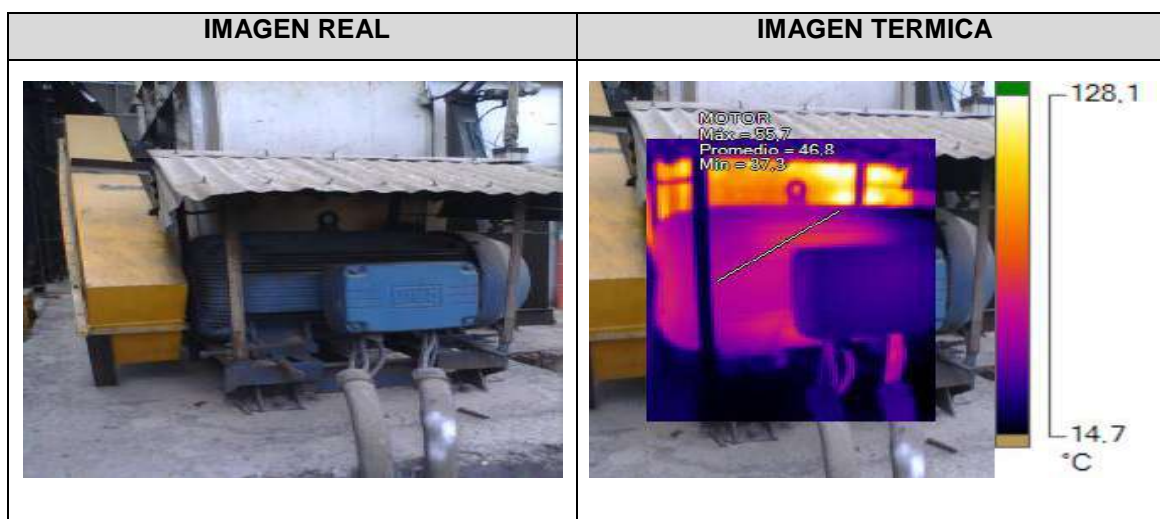


Figura 8.26: Imagen real y térmica del motor exhaustor derecho.

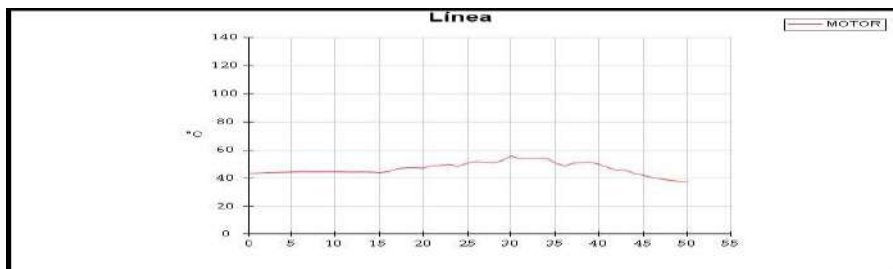


Figura 8.27: Variación de temperatura motor exhaustor derecho.

TEMPERATURAS						
Nombre	Promedio	Mín	Máx	Emisividad	Segundo plano	Desviación Estándar
Motor	46,8°C	37,3°C	55,7°C	0,95	14,7°C	4,45

Tabla 8.19: Temperatura del motor exhaustor derecho.

8.6.3.1.1. Resumen de la imagen térmica

El motor exhaustor derecho presenta una temperatura promedio de 46,8°C el cual está expuesto a temperaturas elevadas de funcionamiento por su ubicación a lado mismo de la caldera. En condiciones generales no presenta elevaciones de temperatura considerable.

Sugerencia: Seguir tendencia trimestral de las variables.

8.6.3.2. Tablero exhaustor derecho

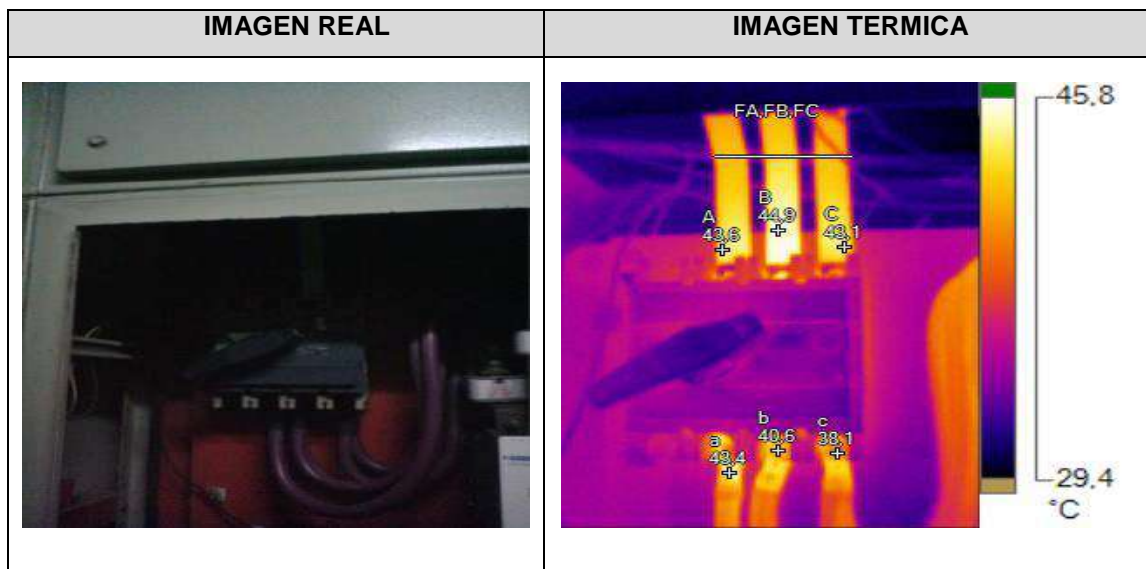


Figura 8.28: Imagen real y termica conductor y contactos exhaustor derecho.

TEMPERATURAS						
Nombre	Promedio	Mín	Máx	Emisividad	Segundo plano	Desviación estándar
FA,FB,FC	39,2°C	33,3°C	42,2°C	0,95	29,4°C	3,12

TEMPERATURAS			
Nombre	Temperatura	Emisividad	Segundo plano
A	43,6°C	0,95	29,4°C
B	44,9°C	0,95	29,4°C
C	43,1°C	0,95	29,4°C
a	43,4°C	0,95	29,4°C
b	40,6°C	0,95	29,4°C
c	38,1°C	0,95	29,4°C

Tabla 8.20: Temperatura de conductor y contactos exhaustor derecho.

ANALISIS

Temperatura referencia	29,4°C
ΔT Fase B	15,5°C
Prioridad	2
Relevancia	LEVE

Tabla 8.21: Análisis de temperatura tablero exhaustor derecho.

Los criterios de severidad empleados para el análisis de las anomalías térmicas en este informe es el sugerido por NETA (InterNational Electrical Testing Association) en su Maintenance Testing Esprcifications.

8.6.3.2.1. Resumen de la imagen térmica

El tablero del exhaustor derecho nos indica que los conductores y contactos del interruptor presentan una elevación de temperatura ΔT de 15,5°C. Según criterio de severidad de la norma NETA presentando un nivel de prioridad 2, se observa que todos los conductores y contactos tienen temperaturas similares alrededor de los 43°C. El punto más caliente se observa entre el contacto y conductor en la llegada a la fase B.

Los contactos y los conductores no poseen muy altas temperaturas, está operando en condiciones normales.

Sugerencia: Seguir tendencia trimestral de las variables.

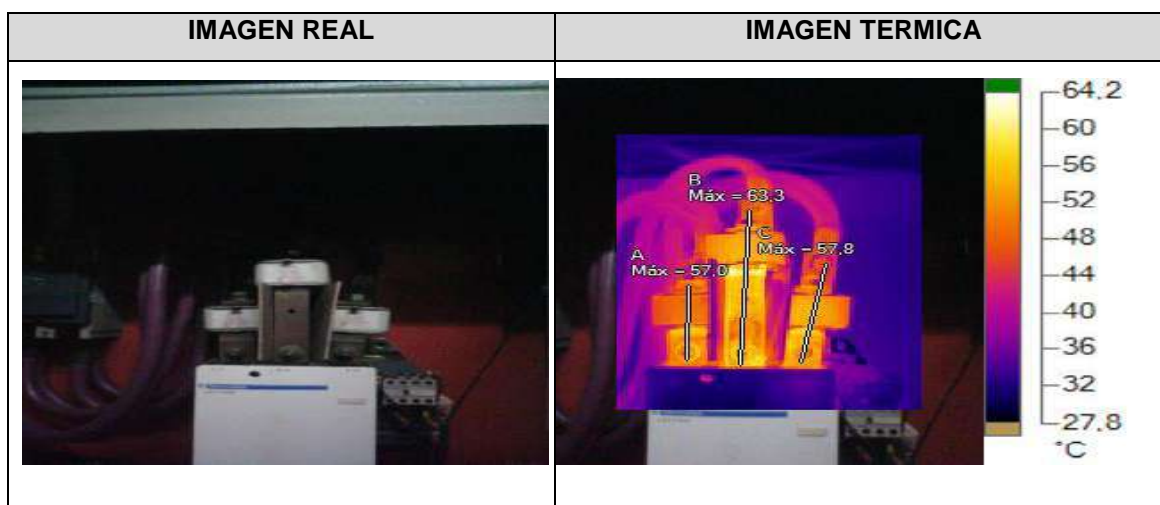


Figura 8.29: Imagen real y termica fusible y contactos exhaustor derecho.

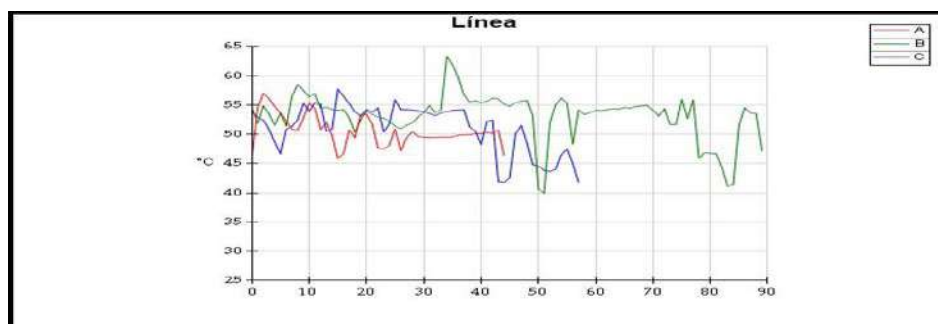


Figura 8.30: Variación de temperatura fusible y contactos tablero exhaustor derecho.

TEMPERATURAS						
Nombre	Promedio	Mín	Máx	Emisividad	Segundo plano	Desviación estándar
A	50,6°C	45,8°C	57,0°C	0,95	27,8°C	2,63
B	53,2°C	40,0°C	63,3°C	0,95	27,8°C	3,99
C	51,0°C	41,8°C	57,8°C	0,95	27,8°C	4,22

Tabla 8.22: Temperatura de contactos y fusible tablero exhaustor derecho.

ANALISIS

Temperatura referencia	27,8°C
ΔT B	25,4°C
Prioridad	3
Relevancia	ALARMA

Tabla 8.23: Análisis de temperatura fusible y contactos tablero exhaustor derecho.

Los criterios de severidad empleados para el análisis de las anomalías térmicas en este informe es el sugerido por NETA (InterNational Electrical Testing Association) en su Maintenance Testing Esprcifications.

8.6.3.2.2. Resumen de la imagen térmica

Los fusibles y sus contactos presentan elevadas temperaturas en las tres con un promedio de temperatura de 51°C y un ΔT de 25,4°C en la fase B. Según criterio de severidad de la norma NETA presentando un nivel de prioridad 3.

Sugerencia: Realizar una parada programada en las próximas 4 semanas para realizar los ajustes el reapriete de bornes y verificación de corrientes de fases.

8.6.4. Captación de agua motor 1

8.6.4.1. Motor captación 1

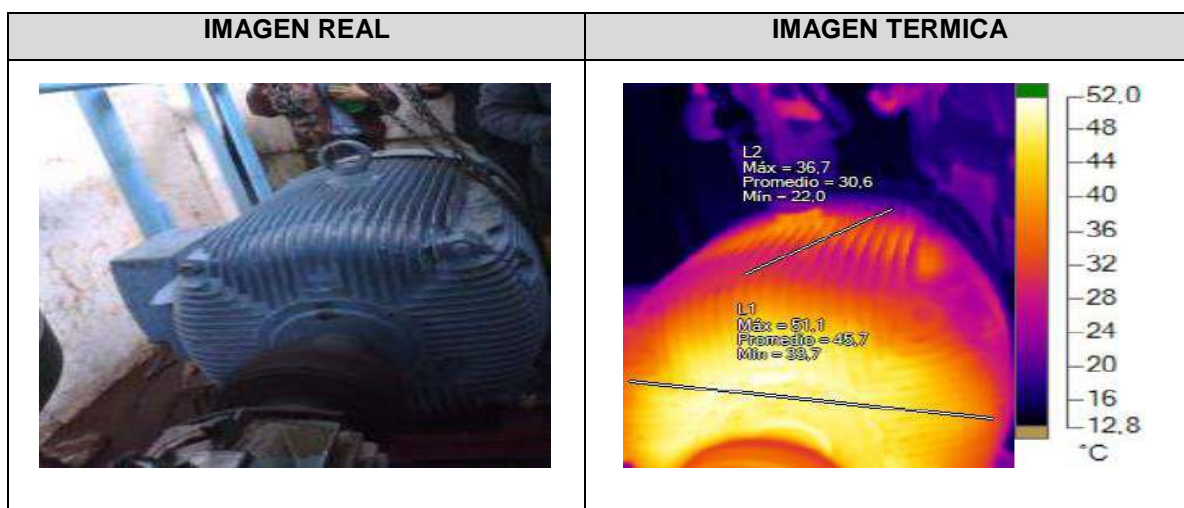


Figura 8.31: Imagen real y térmica del motor 1 captación.

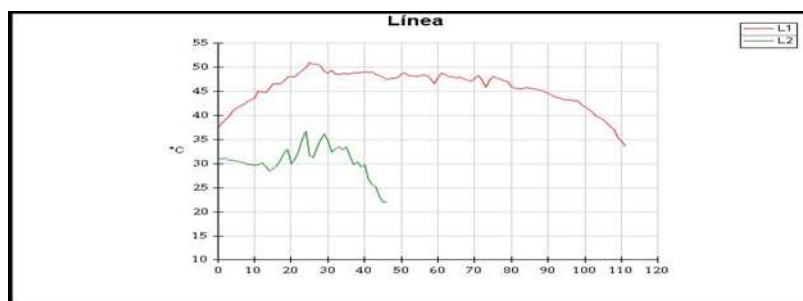


Figura 8.32: Variación de temperatura motor captación 1 captación.

TEMPERATURAS						
Nombre	Promedio	Mín	Máx	Emisividad	Segundo Plano	Desviación estándar
L1	45,7°C	33,7°C	51,1°C	0,95	12,8°C	3,76
L2	30,6°C	22,0°C	36,7°C	0,95	12,8°C	3,17

Tabla 8.24: Temperatura del motor 1 captación.

8.6.4.1.1. Resumen de la imagen térmica

El motor N°1 presenta promedio de temperatura de 45,7°C lado rodamiento y de 30,6°C en carcasa habiendo una diferencia de temperatura entre estas en el motor mostrando indicios de posibles anomalías.

Sugerencia: Analizar resultados del análisis por vibraciones para programación de parada si precisa, seguir tendencia trimestral de las variables.

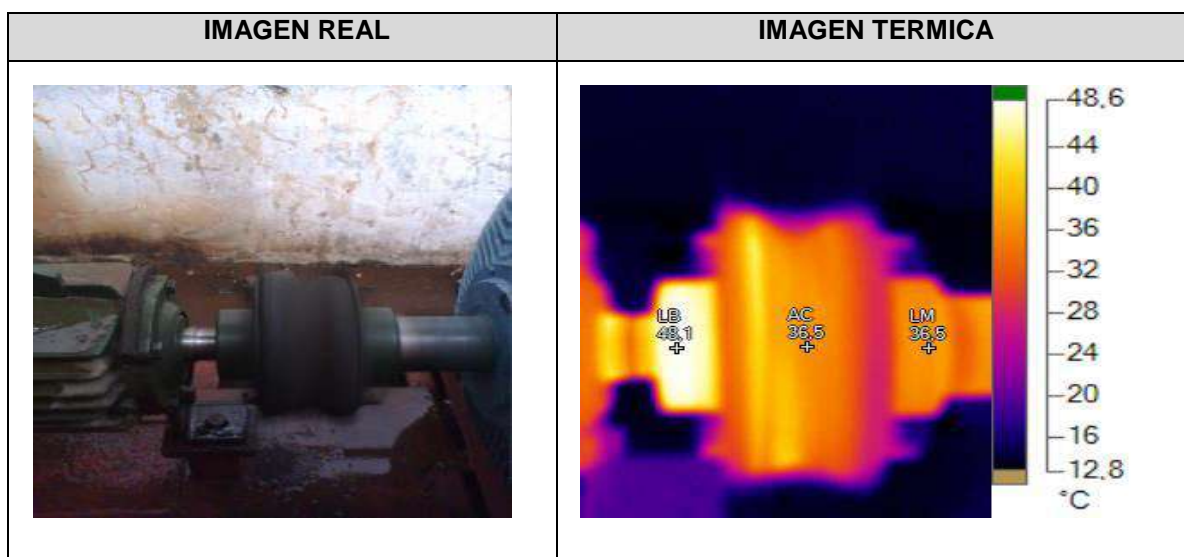


Figura 8.33: Imagen real y térmica acople motor 1 captación.

TEMPERATURAS			
Nombre	Temperatura	Emisividad	Segundo plano
LB	48,1°C	0,95	12,8°C
AC	36,5°C	0,95	12,8°C
LM	36,5°C	0,95	12,8°C

Tabla 8.25: Temperatura acople motor 1 captación.

8.6.4.1.2. Resumen de la imagen térmica

El acople Motor-Bomba N°1 presenta diferencias de temperatura teniendo una ΔT de 11,6°C entre el acople lado bomba y lado motor.

Sugerencia: Realizar una parada programada en las próximas 4 semanas para verificación del acople y correcta alineación.

8.6.4.2. Tablero motor captación 1

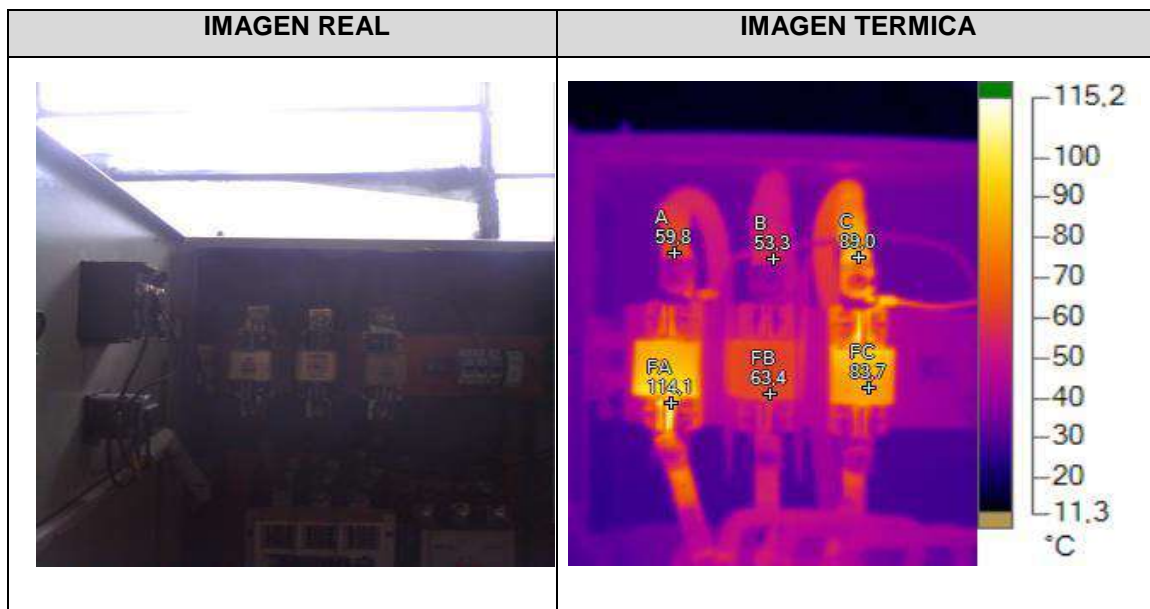


Figura 8.34: Imagen real y termica fusible y contactos tablero motor 1captación.

TEMPERATURAS			
Nombre	Temperatura	Emisividad	Segundo plano
A	59,8°C	0,95	11,3°C
B	53,3°C	0,95	11,3°C
C	89,0°C	0,95	11,3°C
FA	114,1°C	0,95	11,3°C
FB	63,4°C	0,95	11,3°C
FC	83,7°C	0,95	11,3°C

Tabla 8.26: Temperaturas defusibles y contactos tablero motor 1captación.

ANALISIS	
Temperatura referencia	11,3°C
ΔT	50,6°C
Prioridad	5
Relevancia	ALERTA

Tabla 8.27: Analisis de temperatura tablero motor 1 captación.

Los criterios de severidad empleados para el análisis de las anomalías térmicas en este informe es el sugerido por NETA (InterNational Electrical Testing Association) en su Maintenance Testing Esprcifications.

8.6.4.2.1. Resumen de la imagen térmica

El tablero del Motor N°1 nos indica que el fusible de la fase A y C presenta una elevación de temperatura ΔT de 50,6°C. Según criterio de severidad de la norma NETA está operando en condición muy crítica presentando un nivel de prioridad 5, la fase A presenta la mayor temperatura de 114,1°C en comparación con la B que es de 63,4°C.

Sugerencia: Realizar una parada programada en las próximas 2 semanas para realizar los ajustes el reapriete de bornes y verificación de corrientes de fases.

8.6.5. Captación de agua motor 2

8.6.5.1. Motor captación 2

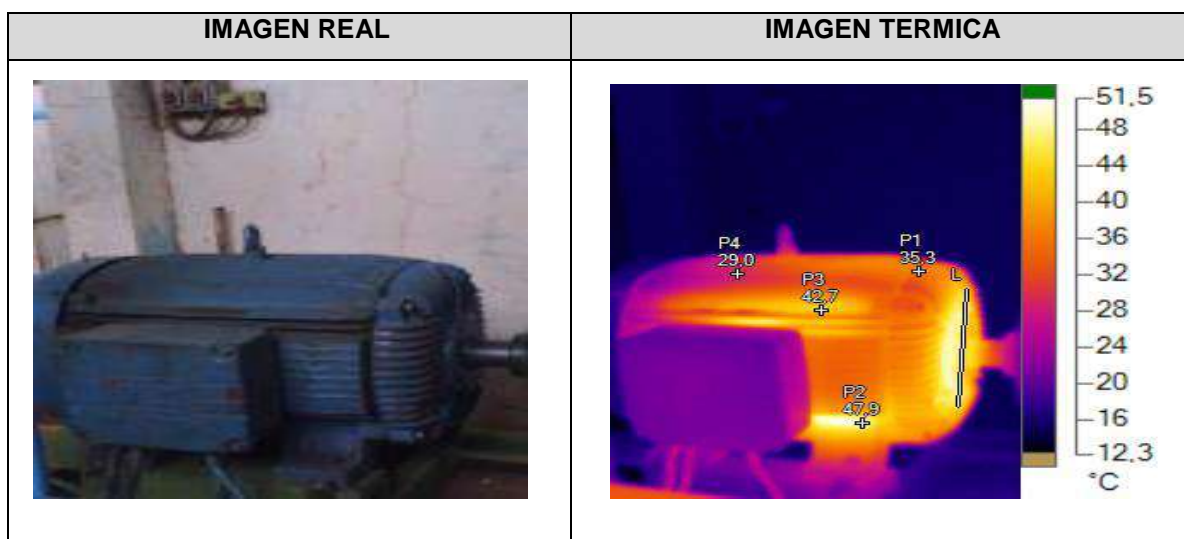


Figura 8.35: Imagen real y térmica del motor 2 captación.

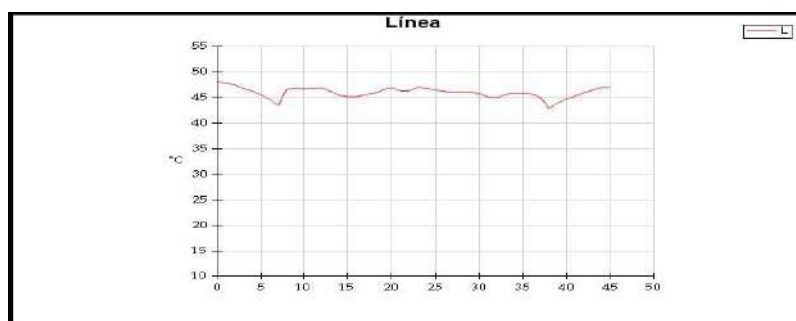


Figura 8.36: Variación de temperatura motor 2 captación.

TEMPERATURAS						
Nombre	Promedio	Mín	Máx	Emisividad	Segundo plano	Desviación estándar
L	46,0°C	43,0°C	48,1°C	0,95	12,3°C	1,03

TEMPERATURAS			
Nombre	Temperatura	Emisividad	Segundo plano
P1	35,3°C	0,95	12,3°C
P2	47,9°C	0,95	12,3°C
P3	42,7°C	0,95	12,3°C
P4	29,0°C	0,95	12,3°C

Tabla 8.28: Temperatura del motor 2 captación.

8.6.5.1.1. Resumen de la imagen térmica

El motor N°2 muestra promedio de 46°C lado rodamiento la carcasa misma también despliega variaciones de temperatura, el motor muestra indicios de posibles inconvenientes en etapa de desarrollo.

Sugerencia: Analizar resultados del análisis por vibraciones para programación de parada si precisa, seguir tendencia trimestral de las variables.

8.6.5.2. Tablero motor captación 2

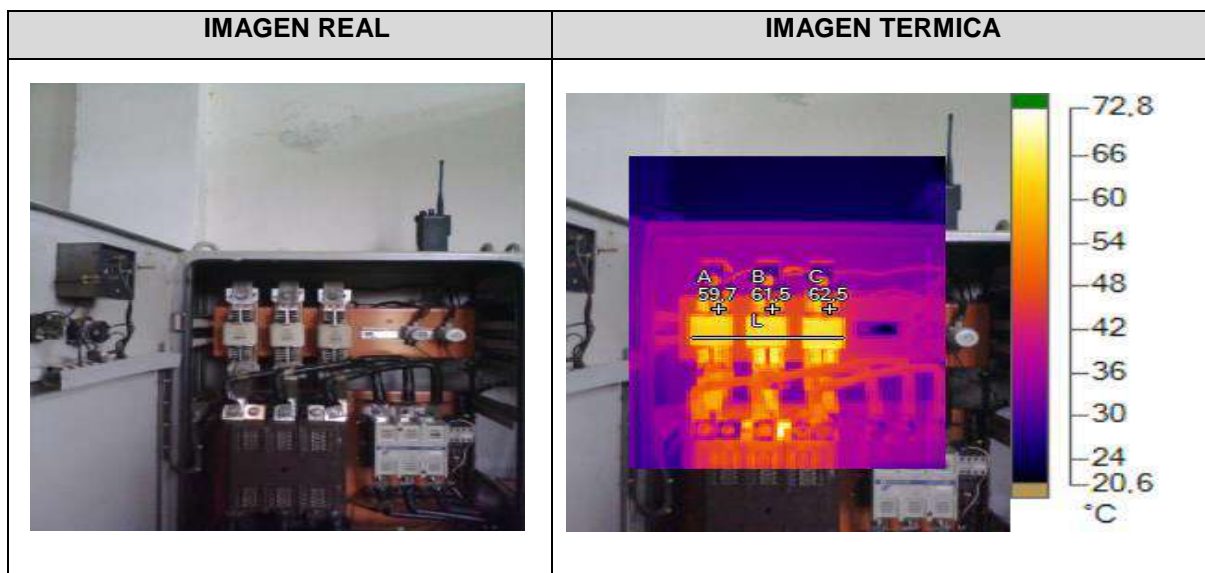


Figura 8.37: Imagen real y termica fusible y contactos tablero motor 2captación.

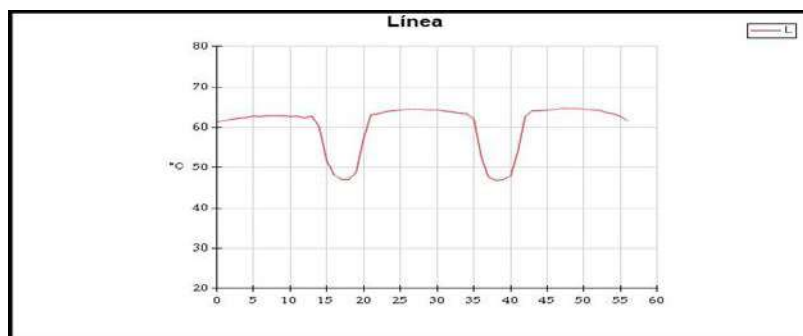


Figura 8.38: Variación de temperatura tablero motor 2 captación.

TEMPERATURAS						
Nombre	Promedio	Mín	Máx	Emisividad	Segundo plano	Desviación estándar
L	60,5°C	46,8°C	64,8°C	0,95	20,6°C	5,89

TEMPERATURAS			
Nombre	Temperatura	Emisividad	Segundo plano
A	59,7°C	0,95	20,6°C
B	61,5°C	0,95	20,6°C
C	62,5°C	0,95	20,6°C

Tabla 8.29: Temperatura fusible y contactos tablero motor 2captación.

ANALISIS	
Temperatura referencia	20,6°C
ΔT	41,9°C
Severidad	5
Clasificación	ALERTA

Tabla 8.30: Analisis de temperatura tablero motor 2captación.

Los criterios de severidad empleados para el análisis de las anomalías térmicas en este informe es el sugerido por NETA (InterNational Electrical Testing Association) en su Maintenance Testing Esprcifications.

8.6.5.2.1. Resumen de imagen térmica

El tablero del Motor N°2 nos indica que los fusibles de la fase A, B y C presenta una elevación de temperatura ΔT de 41,9°C. Según criterio de severidad de la norma NETA está operando en condición muy crítica presentando un nivel de prioridad 5, las tres fases presentan muy altas temperaturas.

Sugerencia: Realizar una parada programada en las próximas 2 semanas para realizar los ajustes el reapriete de bornes y verificación de corrientes de fases.

8.6.6. Captación de agua motor 4

8.6.6.1. Motor captación 4

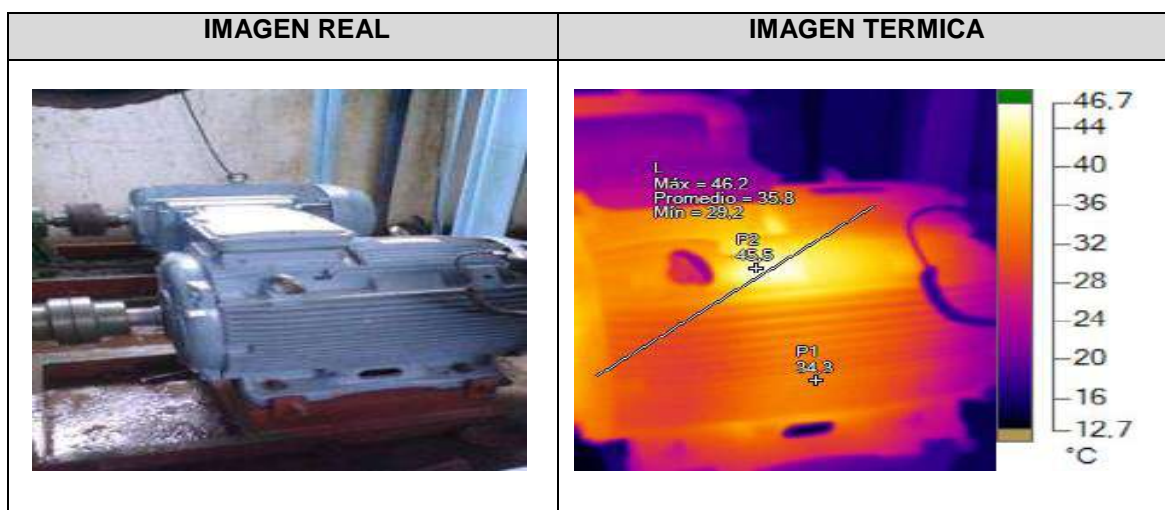


Figura 8.39: Imagen real y térmica del motor 4captación.

TEMPERATURAS						
Nombre	Promedio	Mín	Máx	Emisividad	Segundo plano	Desviación estándar
L	35,8°C	29,2°C	46,2°C	0,95	12,7°C	5,50

TEMPERATURAS			
Nombre	Temperatura	Emisividad	Segundo plano
P1	34,3°C	0,95	12,7°C
P2	45,5°C	0,95	12,7°C

Tabla 8.31: Temperatura del motor 4 captación.

8.6.6.1.1. Resumen de la imagen térmica

El motor N°4 muestra en el punto P2 una temperatura de 45,5°C un punto caliente muy concentrado en condiciones generales la carcasa no presenta temperaturas elevadas.

Sugerencia: Analizar resultados del análisis por vibraciones para mejor diagnóstico, seguir tendencia trimestral de las variables.

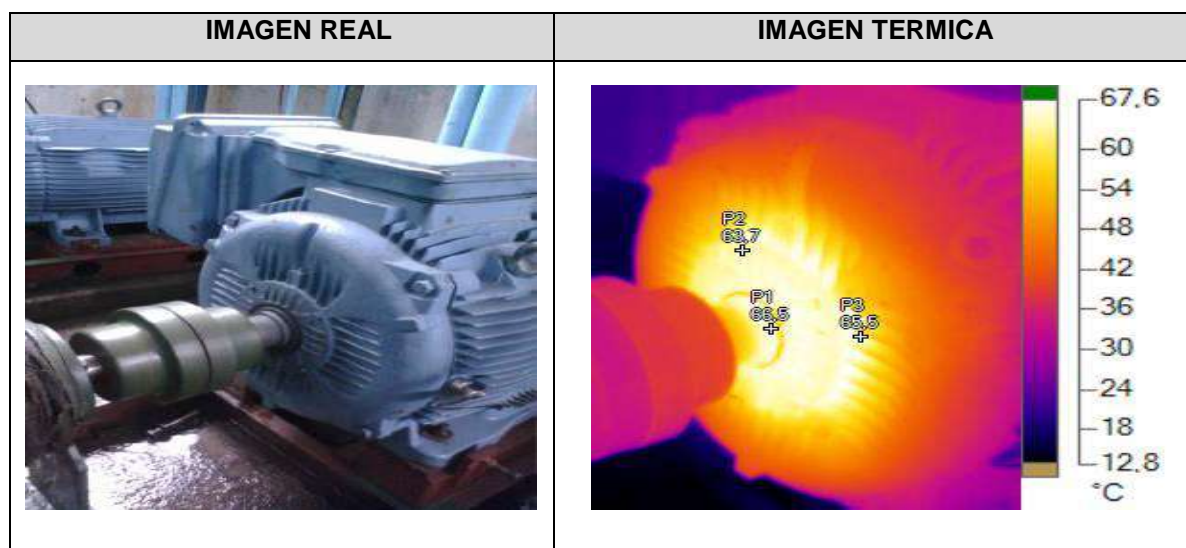


Figura 8.40: Imagen real y térmica lado rodamiento del motor 4captación.

TEMPERATURAS			
Nombre	Temperatura	Emisividad	Segundo plano
P1	66,5°C	0,95	12,8°C
P2	63,7°C	0,95	12,8°C
P3	65,5°C	0,95	12,8°C

Tabla 8.32: Temperatura lado rodamiento del motor 4 captación.

8.6.6.1.2. Motor captación 4

El rodamiento del motor N°4 presenta un promedio de 64°C en el sector del rodamiento existiendo una diferencia de temperatura elevada con relación a la carcasa en general. Hay indicios de fallas en proceso de desarrollo.

Sugerencia: Analizar resultados del análisis por vibraciones para programación de parada si precisa, seguir tendencia trimestral de las variables.

8.6.6.2. Tablero motor captación 4

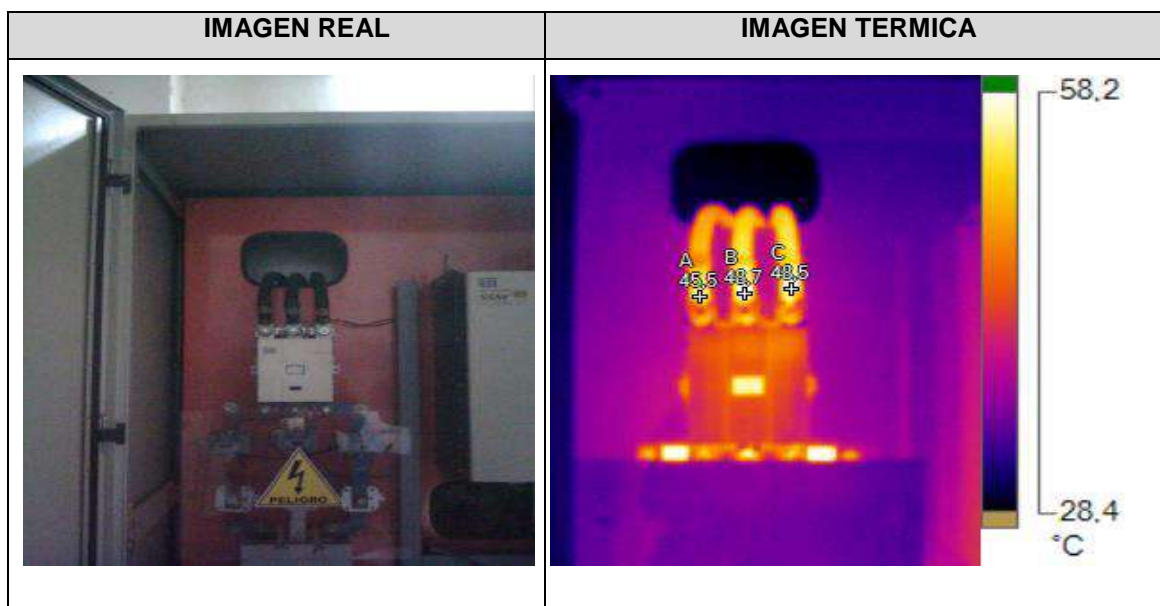


Figura 8.41: Imagen real y termica de conductores y contactos tablero motor 4 captación.

TEMPERATURAS			
Nombre	Temperatura	Emisividad	Segundo plano
A	45,5°C	0,95	28,4°C
B	48,7°C	0,95	28,4°C
C	48,5°C	0,95	28,4°C

Tabla 8.33: Temperatura conductores y contactos tablero motor 4 captación.

ANALISIS	
Temperatura referencia	28,4°C
ΔT B	20.3°C
Prioridad	3
Relevancia	ALARMA

Tabla 8.34: Analisis de temperatura tablero motor 4captación.

Los criterios de severidad empleados para el análisis de las anomalías térmicas en este informe es el sugerido por NETA (InterNational Electrical Testing Association) en su Maintenance Testing Esprcifications.

8.6.6.2.1. Resumen de la imagen térmica

El tablero del Motor N°4 nos indica que los conductores y sus contactos presenta una elevación de temperatura el de la fase B es de ΔT de 20,3°C. Según criterio de severidad de la norma NETA presentando un nivel de prioridad 3, las fases A y B indican también elevadas temperaturas similares al de la fase B.

Sugerencia: Realizar una parada programada en las próximas 4 semanas para realizar los ajustes el reapriete de bornes y verificación de corrientes de fases.

8.6.7. Captación de agua motor 5

8.6.7.1. Motor captación 5

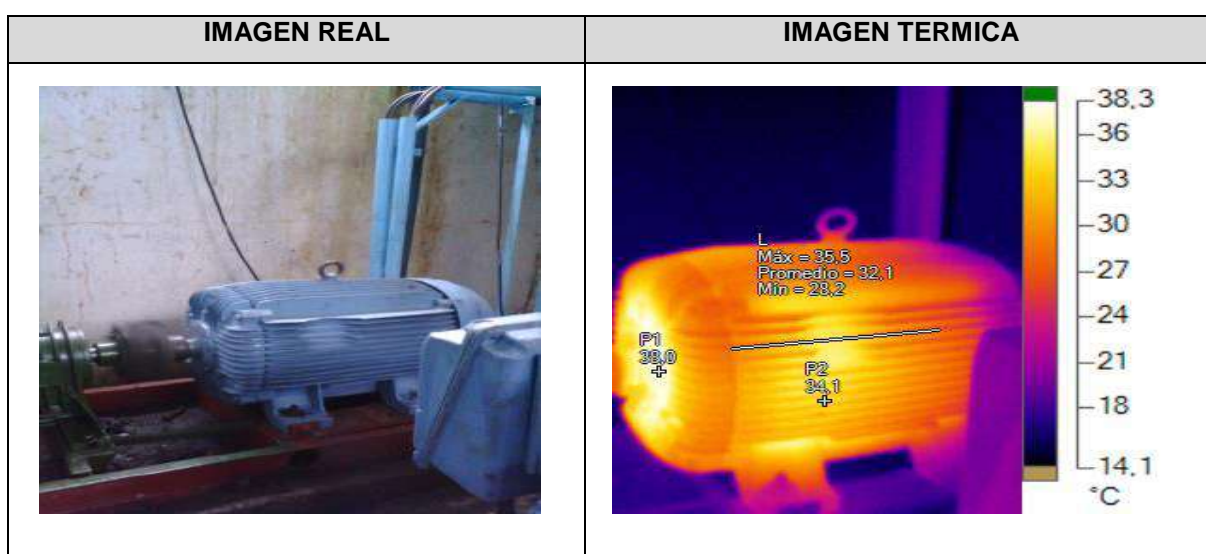


Figura 8.42: Imagen real y térmica del motor 5 captación.

TEMPERATURAS						
Nombre	Promedio	Mín	Máx	Emisividad	Segundo plano	Desviación estándar
L	32,1°C	28,2°C	35,5°C	0,95	14,1°C	2,27

TEMPERATURAS			
Nombre	Temperatura	Emisividad	Segundo plano
P1	38,0°C	0,95	14,1°C
P2	34,1°C	0,95	14,1°C

Tabla 8.35: Temperatura del motor 5 captación.

8.6.7.1.1. Motor captación 5

El motor N°5 no presenta indicios de anomalías la temperatura de operación es de 32,1°C.

Sugerencia: Seguir tendencia trimestral de las variables.

8.6.7.2. Tablero motor captación 5

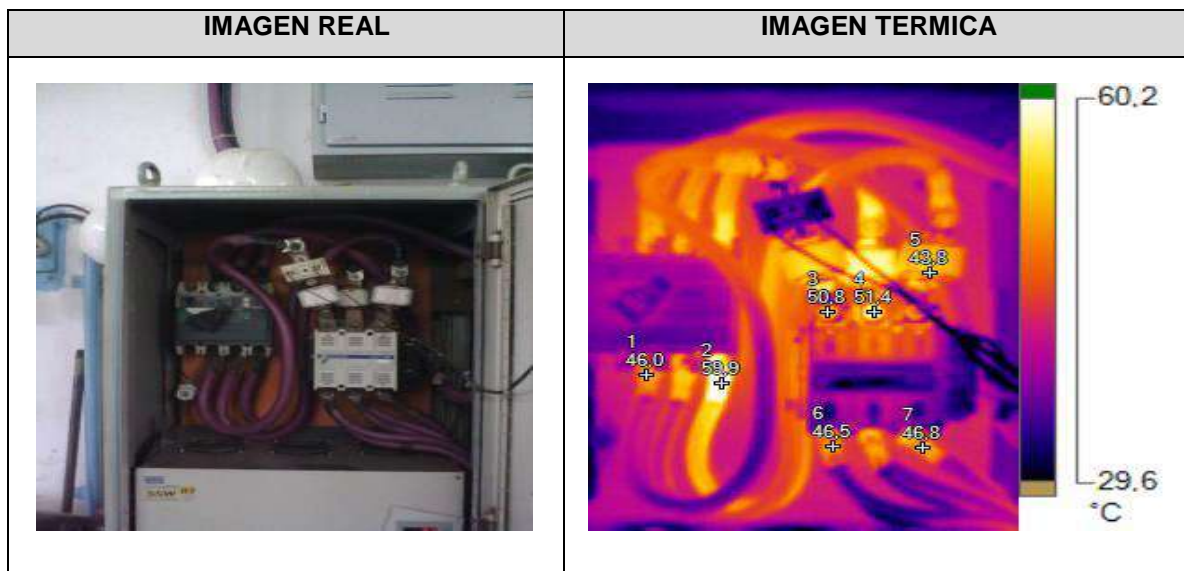


Figura 8.43: Imagen real y termica de conductores y contactos tablero motor 5 captación.

TEMPERATURAS			
Nombre	Temperatura	Emisividad	Segundo plano
1	46,0°C	0,95	29,1°C
2	59,9°C	0,95	29,1°C
3	50,8°C	0,95	29,1°C
4	51,4°C	0,95	29,1°C
5	43,8°C	0,95	29,1°C
6	46,5°C	0,95	29,1°C
7	46,8°C	0,95	29,1°C

Tabla 8.36: Temperatura conductores y contactos tablero motor 5 captación.

ANALISIS

Temperatura referencia	29,1°C
ΔT 2	30,8°C
Prioridad	4
Relevancia	ALARMA

Tabla 8.37: Analisis de temperatura tablero motor 5captación.

Los criterios de severidad empleados para el análisis de las anomalías térmicas en este informe es el sugerido por NETA (InterNational Electrical Testing Association) en su Maintenance Testing Esprcifications.

8.6.7.2.1. Resumen de la imagen térmica

Los contactos y conductores presentan elevadas temperaturas. El contacto y conductor de la fase C en el interruptor punto 2 presenta la mayor temperatura que es de 59,9°C. Según criterio de severidad de la norma NETA presenta un nivel de prioridad 4, los contactos, conductor y el fusible presenta también temperaturas altas.

Sugerencia: Realizar una parada programada en las próximas 4 semanas para realizar los ajustes el reapriete de bornes y verificación de corrientes de fases.

8.7. Análisis de las técnicas de inspección

Mediante estas dos técnicas de inspección constatamos los diversos problemas presentes y las malas condiciones de operación de estos motores.

Los problemas más comunes encontrados por medio de la inspección por vibraciones son:

- Desalineación de los ejes.

- Acoples mal hechos.
- Desbalance.

En consecuencia, a través de la inspección térmica se observa:

- Rodamientos muy calientes.
- Temperaturas elevadas en el acople.
- Considerables temperaturas en los motores.
- Puntos muy calientes.
- Conductores con elevadas temperaturas.
- Contactos de fusibles muy calientes.

La importancia de estas técnicas de inspección es que un problema de desalineación detectado por vibraciones genera malas condiciones de operación en los rodamientos, esto se puede observar mediante inspección térmica detectando elevadas temperaturas en las mismas.

De esta manera se ve la importancia de enlazar estas dos técnicas de inspección para obtener las condiciones de operación y actuar cuando sea necesario en el tiempo indicado evitando de esta forma fallas más complejas.

8.8. Propuesta de inspección

Mediante las inspecciones realizadas a través de las técnicas de vibraciones y termografía nos da la pauta y la necesidad de implementación de las mismas en estos motores, ya que esta tecnología nos permite detectar las condiciones de operación de las mismas y de la mejor manera posible.

TAREAS	Frecuencia		
	1 Mes	3 Meses	6 Meses
Periodo Zafra			
1. Inspección rutinaria	x		
2. Termografía		x	
3. Vibraciones			x

Tabla 8.38: Propuesta de mantenimiento.

Esta propuesta consiste en incluir estas técnicas durante la zafra incluyendo también una inspección visual rutinaria a los motores y sus tableros revisión de ajustes, estado de conexiones limpieza etc.

Esto consiste en tres mediciones de temperatura por cada zafra distribuida de la siguiente forma:

Inspección térmica	Periodo		
	Inicio de zafra	Mediados de zafra	Final de zafra
	X	X	X

Tabla 8.39: Periodo de inspección térmica.

La inspección por vibraciones consiste en dos mediciones por zafra distribuidas de la siguiente forma:

Inspección por vibración	Periodo	
	Inicio de zafra	Final de zafra
	X	X

Tabla 8.40: Periodo de inspección por vibración.

IX. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Un resumen de los resultados en la inspección por vibraciones muestra que el motor exhaustor izquierdo presenta niveles de vibraciones normales, mientras que el motor exhaustor derecho arroja niveles de vibraciones globales de 5,37 mm/s rms que indica condiciones de alerta según criterio de severidad. Los motores 1,4,5 del sector de captación presentan niveles de vibraciones fuera de rango está operando en condiciones de riesgos de fallas, el motor 1 presenta desalineación, el 4 desbalanceo y el 5 presenta desbalanceo estático, el motor 2 presenta niveles de vibraciones dentro del rango normal.

En la inspección térmica del sector mesa alimentadora el motor los contactos y conductores del tablero están en condiciones normales de operación. Los conductores y contactos del interruptor del motor exhaustor izquierdo presenta leves elevaciones de temperatura, los fusibles y contactos tienen mayor temperatura principalmente en la fase B con un promedio de temperatura de 51,9°C que excede condiciones normales de operación, los conductores contactos y fusibles del motor exhaustor derecho también presenta elevaciones de temperaturas muy similares quedando también fuera del rango de operación normal.

El acople del motor 1 sector captación tiene una diferencia de temperatura de 11,6°C, los fusibles del tablero de la fase A y C indica elevaciones de temperatura ΔT de 50,6°C está operando en condiciones de temperatura muy crítica.

Los fusibles del tablero del motor 2 de la fase A, B y C indican una elevación de temperatura ΔT de 41,9°C, el motor 4 presenta un promedio de 64°C en el

sector del rodamiento, el conductor y contacto de la fase C del tablero indica punto caliente de 59,9°C.

En promedio la verificación de estos puntos calientes y problemas de alineación, desbalanceo llevaría 2 días de trabajo a programarse, por ejemplo, los domingos, ya con los repuestos y herramientas necesarias.

De llevarse a cabo las recomendaciones, se tendría un ahorro potencial de 435.240.000 Gs a corto plazo, ya que durante cada periodo de zafra se generan estas pérdidas por averías en los sectores críticos en estudio.

X. CONCLUSIONES

El proyecto es técnicamente factible en su implementación, ya que se ha observado en los resultados de los análisis vibratorios y termográficos hechos la presencia de indicadores de desgaste claves a la hora de determinar piezas a cambiar, que podrían afectar a corto o mediano plazo la disponibilidad en los motores de función crítica, sumado a que constituyen una herramienta valiosa y clave a la hora de programar paradas por mantenimiento, y adquisición de piezas de repuesto sin necesidad de contar con un stock vasto.

La implementación de estas tecnologías es fundamental ya que admite el monitoreo en tiempo real de las máquinas y permite tener un registro de las mediciones para tener elementos de comparación que facilite detectar la progresión de un deterioro.

Desde el punto de vista financiero, se puede concluir que gracias a la evaluación y comparación de la inversión versus la pérdida monetaria por falta de producción que la implementación de este esquema de mantenimiento propuesto es altamente viable.

XI. RECOMENDACIONES

En base a los resultados obtenidos y las conclusiones, se recomienda iniciar el proceso de implementación de los mantenimientos en los motores cuyos análisis muestran condiciones de operación en estado de alarma, ya sea en la programación de la parada, como en la compra de repuestos necesarios.

Se recomienda además trabajar en la elaboración de un nuevo plan de mantenimiento agregando las técnicas predictivas de vibraciones, termografía y la inspección rutinaria al plan de mantenimiento existente.

Finalmente se recomienda iniciar con la estructuración de la implementación de este esquema de mantenimiento predictivo, ya que se observa una proyección de utilidad en mediano plazo (ya para el 2020 inclusive).

XII. APÉNDICE

Apéndice A: Resumen ejecutivo

Apéndice A.1: localización, cobertura espacial del proyecto.

Figura A.1.1: Localización de la planta industrial en la Ciudad de
Mauricio José Troche.

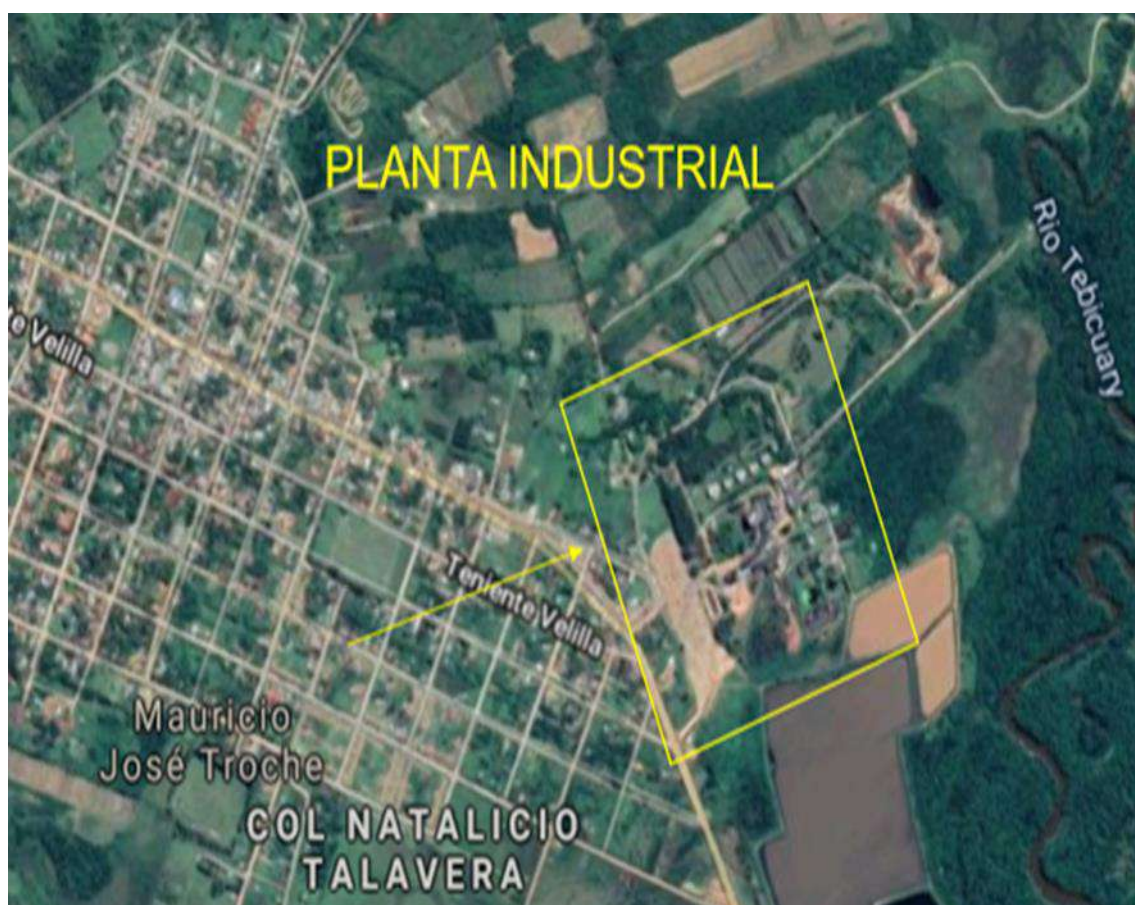


Figura A.1.2: Vista aérea de la planta industrial Petropar.



Apéndice A.2: Sectores de la planta industrial.

Figura A.2.1: Sectores de producción de la planta industrial.

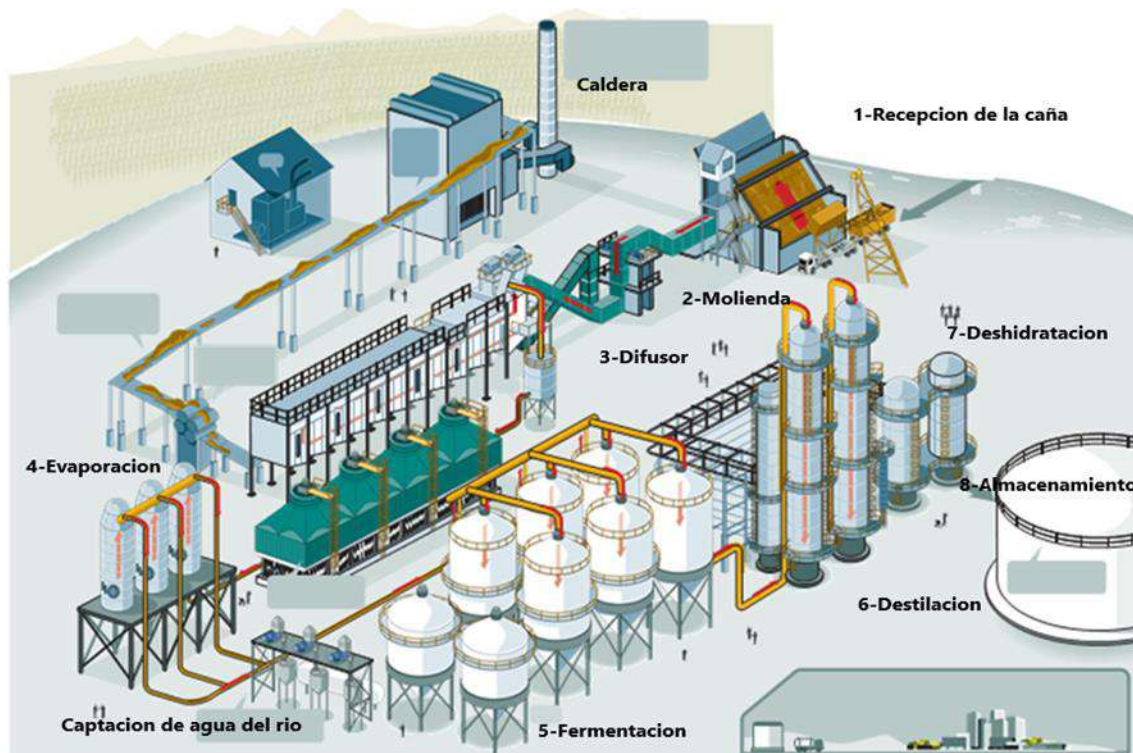


Figura A.2.2: Sector recepción de materia prima.



Figura A.2.3: Acceso principal en la planta alcohólica.



Figura A.2.4: Imagen de camiones en proceso de descarga.



Figura A.2.5: Sector destilería.



Figura A.2.6: Sector stock de repuestos de motores.



Apéndice A.3: Promedio de horas parada por cada zafra.

A.3.1: Promedio de paradas por zafra.

En la planta alcohólica una parada de producción es muy común llegando a cifras de 1,933 hs de parada en el 2016 y de 1,229 hs en el 2017 generándose millonarias pérdidas durante cada zafra ver Figura 8.1 Ingeniería de Diseño.

En la siguiente tabla se observa el porcentaje de distribución de paradas correspondiente a cada tipo de inconvenientes registrados en los sectores pertinentes.

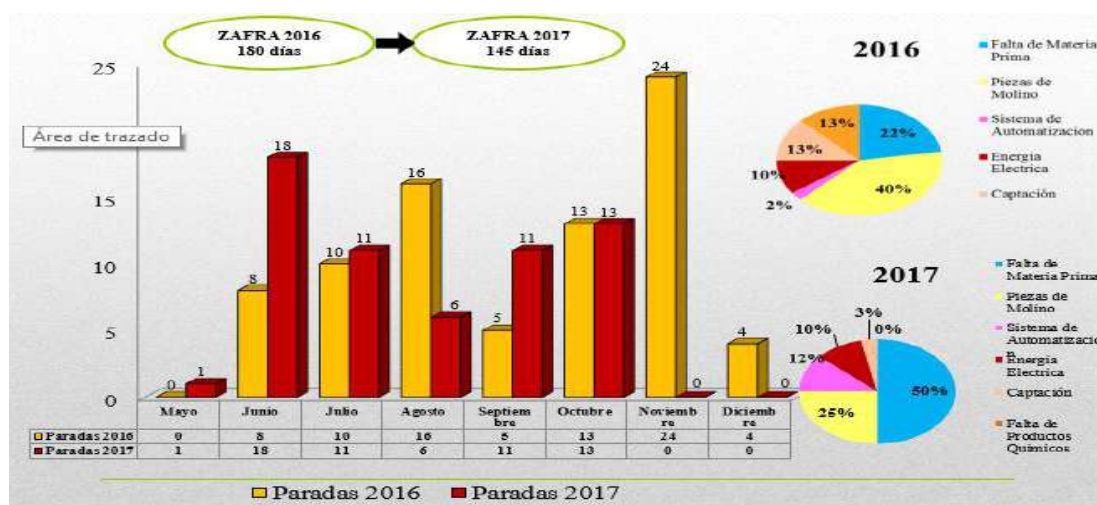


Figura A.3.1: Comparativo horas de parada.

A.3.1.1: Promedio de parada periodo 2016.

Según esta distribución tenemos que en el 2016 el 13% de las horas de parada se registró por inconvenientes en captación esto corresponde a un total de:

$$H_p = \frac{1.933 \text{ hs} \times 13\%}{100\%} = 251,3 \text{ hs}$$

Donde:

H_p =Horas de parada.

De estas 251,3 hs el 70% corresponde a fallas en las bombas y faltas de alimentación quedando un total de:

$$H_p = \frac{251,29 \text{ hs} \times 30\%}{100\%} = 75,4 \text{ hs}$$

Estas horas de parada corresponde a fallos en los motores y tableros de alimentación.

El 2% corresponde a problemas en automatización y equipos de protección en tableros.

$$H_p = \frac{1933 \text{ hs} \times 2\%}{100\%} = 38,66 \text{ hs}$$

De estas 38,66 hs el 20% corresponde a los sectores de mesa alimentadora y caldera quedando un total de:

$$H_p = \frac{38,66 \text{ hs} \times 20\%}{100\%} = 7,7 \text{ hs}$$

Horas parada periodo de zafra 2016 por fallas registradas en mesa alimentadora, caldera, captación:

$$\text{Total horas} = 75,4 \text{ hs} + 7,7 \text{ hs} = 83,1 \text{ hs}$$

A.3.1.2: Promedio de parada periodo 2017.

En el año 2017 hubo un total de 1.229 hs de parada el 12% de esto se registró por inconvenientes en captación esto corresponde a:

$$H_p = \frac{1.229 \text{ hs} \times 12\%}{100\%} = 147,5 \text{ hs}$$

De estas 147,5 hs el 60% corresponde a fallas en las bombas y faltas de alimentación quedando de esta manera un total de:

$$H_p = \frac{147,5 \text{ hs} \times 40\%}{100\%} = 59 \text{ hs}$$

Estas horas de parada corresponde a fallos en los motores y tableros de alimentación.

El 3% corresponde a problemas en automatización y equipos de protección en tableros que corresponde a:

$$H_p = \frac{1.229 \text{ hs} \times 3\%}{100\%} = 36,9 \text{ hs}$$

De estas 36,9 hs el 45% corresponde a los sectores de mesa alimentadora y caldera dando un total de:

$$H_p = \frac{36,9 \text{ hs} \times 45\%}{100\%} = 16,6 \text{ hs}$$

Horas parada periodo de zafra 2017 por fallas registradas en mesa alimentadora, caldera, captación:

$$\text{Total horas} = 59 \text{ hs} + 16,6 \text{ hs} = 75,6 \text{ hs}$$

A.3.1.3: Calculo de horas parada por zafra.

En la siguiente tabla se observa el promedio de horas parada registradas en los sectores críticos.

Promedio horas de parada	
Periodo	Horas de parada
Zafra 2016	83,1 hs
Zafra 2017	75,6 hs

Tabla A.3.1: Horas paradas.

Esto nos da un promedio de parada por cada periodo de:

$$\text{Promedio} = \frac{83,1 \text{ hs} + 75,6 \text{ hs}}{2} = 79,35 \text{ hs}$$

Teniendo esto de referencia tenemos un promedio de paradas de 3 días por zafra debido a fallas registradas en los tres sectores en estudio.

A.3.1.4: Calculo deperdidas por parada de producción.

A continuación, en las tablas se observan el volumen de caña de azúcar no procesada y los litros de alcohol absoluto no elaborados.

Materia prima no procesada		
Detalle	Tiempo	Cantidad (toneladas)
Parada de producción	1 día	1.560
Parada de producción	3 días	4.680

Tabla A.3.2: Caña de azúcar no procesada.

Alcohol absoluto no producido		
Detalle	Tiempo	Cantidad (litros)
Parada de producción	1 día	96.720
Parada de producción	3 días	290.160

Tabla A.3.3: Alcohol absoluto no elaborado.

Las pérdidas por fallas durante el periodo de zafra obtenemos calculando la siguiente expresión:

Teniendo en cuenta el precio del alcohol absoluto que es de 4.500 Gs en promedio y el costo operativo de producción es de aproximadamente de 3,600 Gs entonces tenemos.

$$\text{Ganancia} = 4,500 - 3,600 = 900 \text{ Gs} \times \text{litro}$$

$$\text{Perdidas por dia} = 900 \times 96.720 = 87.048.000 \text{ Gs}$$

Perdidas por parada		
Detalle	tiempo	Costo (Gs)
Parada de producción	1 día	87.048.000

Parada de producción	3 días	261.144.000
----------------------	--------	-------------

Tabla A.3.4: Perdidas por parada.

Apéndice A.4: Costos de implementación de las tecnologías predictivas.

A.4.1: Costos de equipos de medición.

El costo de inversión para adquisición de equipos para efectuar las pruebas se muestra en la siguiente tabla en conjunto con los cursos de las mismas técnicas.

Inversiones	
Detalle	Costo
Cámara termográfica	64.000.000
Analizador de Vibraciones	115.200.000
Curso termografía	14.080.000
Curso Vibraciones	32.000.000
Total	225.280.000

Tabla A.4.1: Plan de inversión proyectada.

El costo de la cámara termográfica fue proveído por la Empresa Rieder & Cia. – Unidad de Mediciones y Comisionamiento, el Analizador de Vibraciones por la Empresa Yguazú Cementos S.A.

Los cursos de termografía por la empresa Provindus S.A, y el de Vibración por JPS Tecnología en Confiabilidad.

A.4.2: Costos de servicios de inspección por termografía y vibraciones.

Los costos de servicio de inspección por termografía y vibraciones se muestran en la siguiente tabla.

Costo del servicio	Por punto
Medición de vibraciones	8 USD
Termografía	5 USD

Tabla A.4.2: Costo de inspección por punto.

En un motor se mide	Vibraciones	Termografía	
	Cantidad de puntos	Tablero	Motor
	5	3	2

Tabla A.4.3: Numero de muestras por equipo.

Costo total por inspección	Vibraciones	Termografía	Total
	40 USD	25 USD	65 USD

Tabla A.4.4: Costo total de inspección por motor - tablero.

Estos costos de inspección fueron proveídos por la empresa Yguazú Cementos S.A.- Departamento de Mantenimiento predictivo.

Teniendo en cuenta las dos tecnologías de inspecciones predictivas el costo es de 65 USD por motor y tomando dos inspecciones por zafra tenemos:

$$\text{Costo anual: } 65 \times 2 = 130 \text{ USD} \times \text{motor}$$

La cantidad total de motores en los sectores críticos es de 9 por consiguiente el costo anual contratando el servicio para estos sectores sería de:

$$\text{Total} = 130 \times 9 = 1.170 \text{ USD} = 7.4880.000 \text{ Gs}$$

A.4.3: Comparativo de costos de inversión.

Costos de inversión	
Costo en adquisición de equipos y ejecución de diagnósticos.	Costo de contratación de inspección por las mismas tecnologías y ejecución de pruebas.
225.280.000 Gs	77.488.000 Gs

Tabla A.4.5: Comparativo de costos.

El costo de 225.280.000 Gs se obtuvo de la Tabla A.4.1, mientras tanto el valor de 77.488.00 Gs está especificado con mayor detalle en la Tabla C.1.

A través de esto se puede observar que existe una diferencia en el costo a favor de contratar servicios de inspección.

Dando una diferencia considerable de:

$$225.280.000 \text{ Gs} - 77.480.000 \text{ Gs} = 147.800.000 \text{ Gs}$$

Apéndice B: Ingeniería de diseño.

Apéndice B.1: Sector crítico de producción mesa alimentadora.

Figura B.1.1: Sector de producción mesa alimentadora.



Figura B.1.2: Motor crítico del sector mesa alimentadora.



Apéndice B.2: Sector crítico de producción caldera.

Figura B.2.1: Motor crítico del sector caldera.



Figura B.2.2: Amperímetro en tablero del motor sector caldera.



Apéndice B.3: Sector crítico de producción captación de agua.

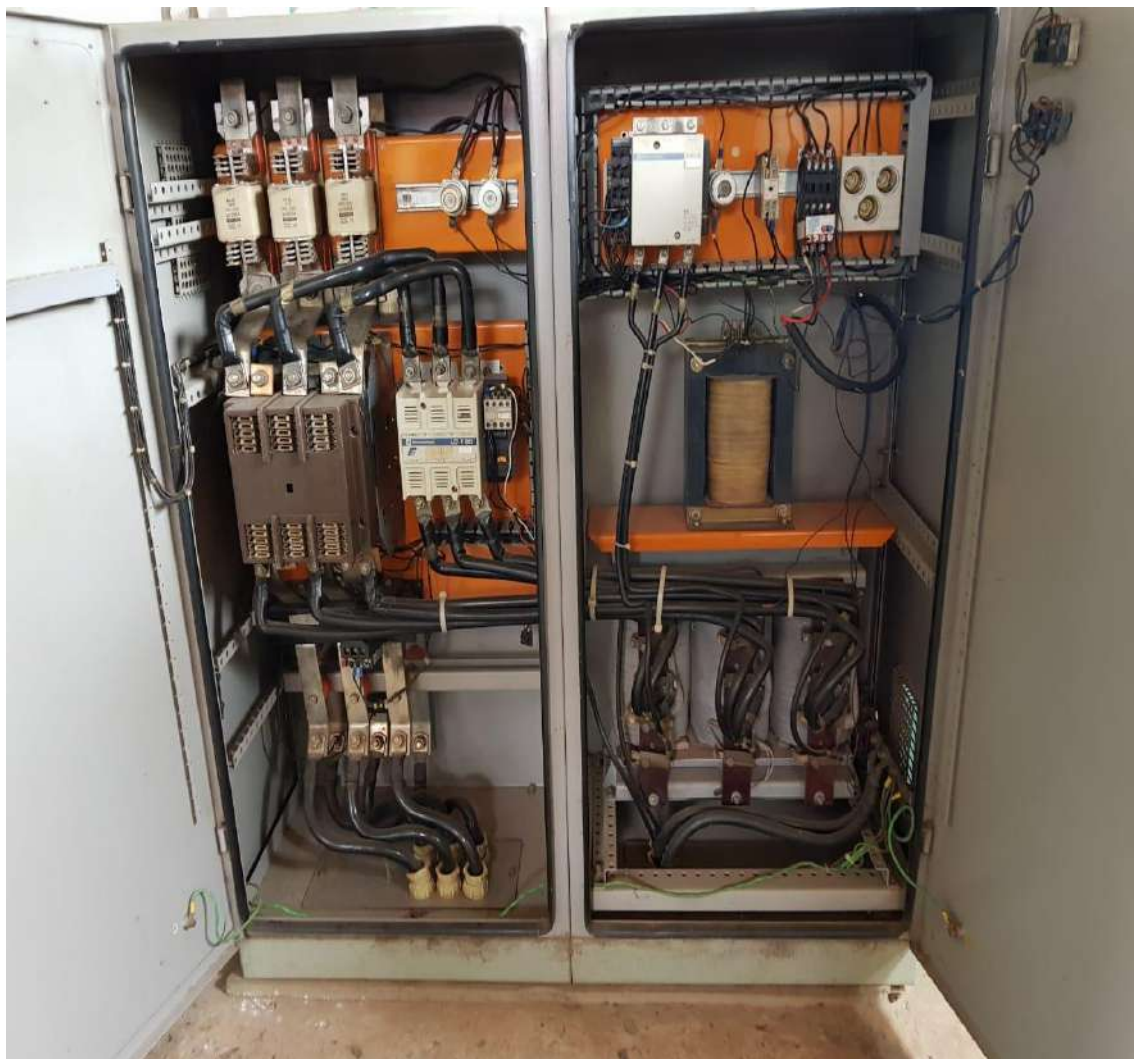
Figura B.3.1: Sector captación a orillas del río Tebicuary.



Figura B.3.2: Motores críticos del sector captación.



Figura B.3.3: Tablero de uno de los motores críticos de captación.



Apéndice B.4: Inspección de termografía en motores y tableros.

Figura B.4.1: Inspección térmica en motores críticos.



Figura B.4.2: Inspección térmica en tableros de motores críticos.



Apéndice B.5: Inspección de vibraciones en motores.

Figura B.5.1: Proceso de inspección por vibraciones.

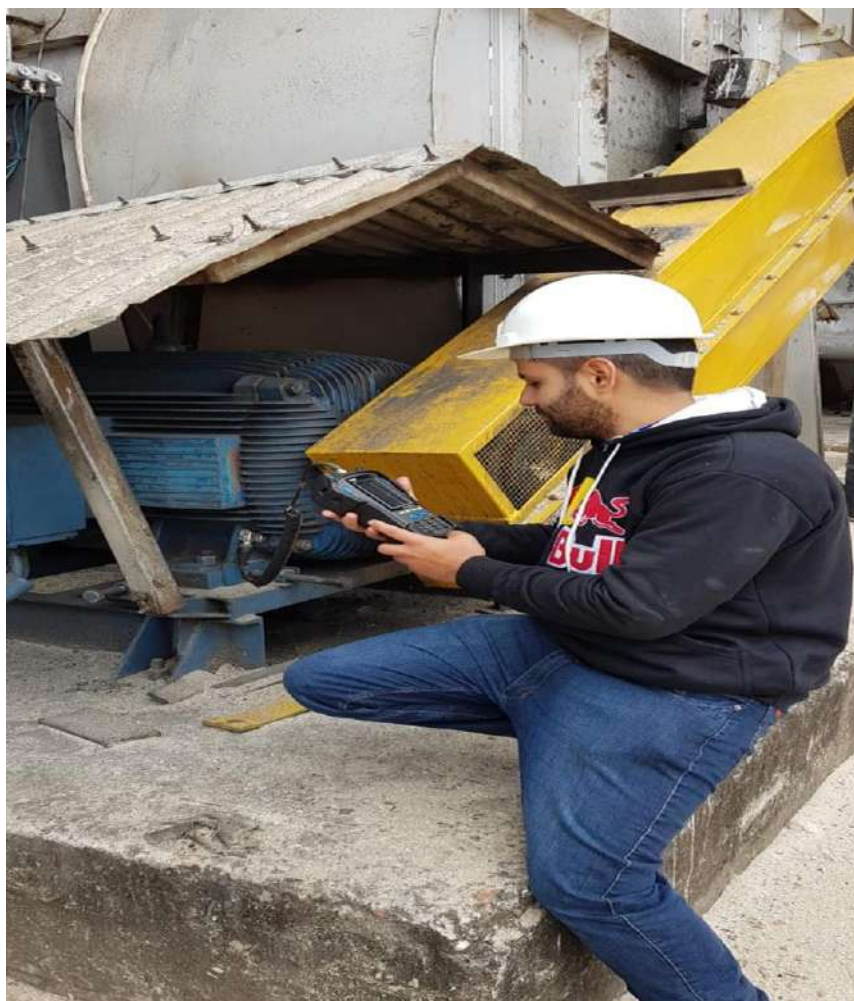
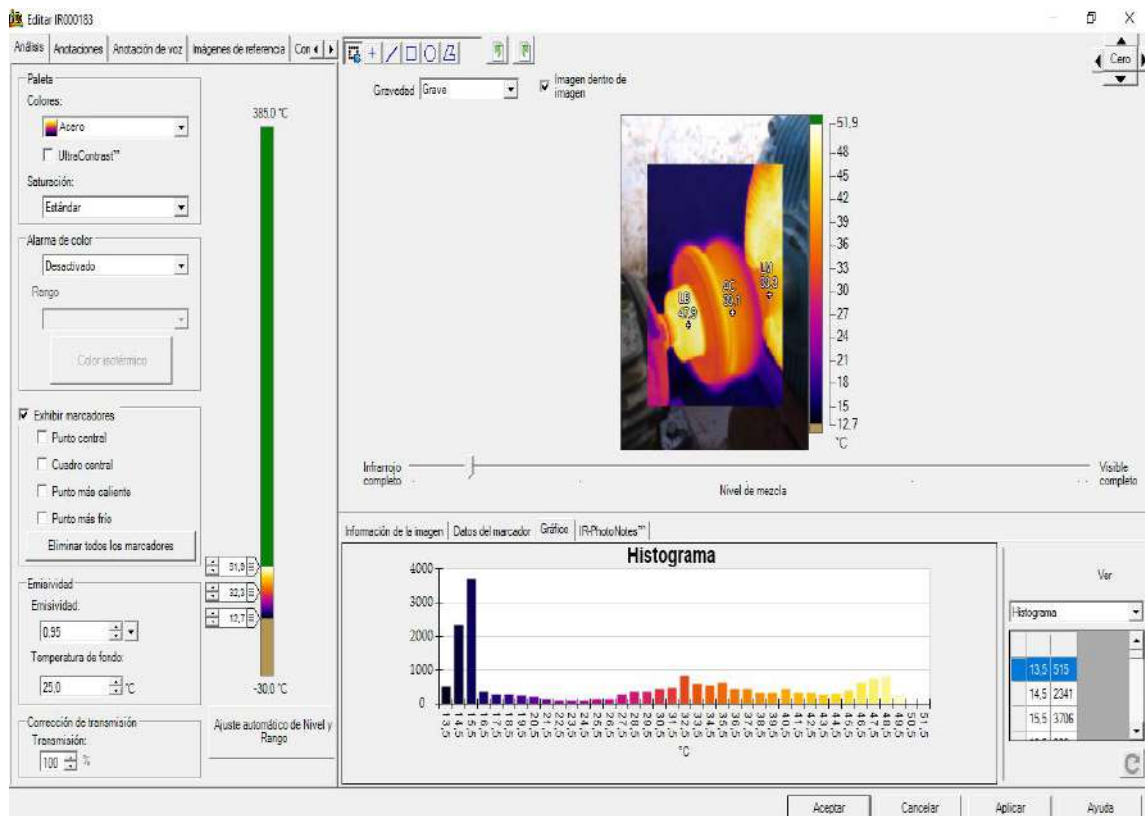


Figura B.5.2: Orientación del punto de prueba del acelerómetro.



Apéndice B.6: Proceso de análisis de la inspección por termografía.

Figura B.6.1: Software de análisis SmartView.



Apéndice C: Evaluación económica.

Apéndice C.1: Determinación de la Tasa Interna de Retorno (TIR), Valor Actual Neto (VPN) y el Periodo de Retorno de la inversión (PRI).

C.1.1 Elaboración del flujo de caja proyectada

Una vez desarrollada el flujo de caja proyectada de las inversiones y beneficios previstos con la implementación de las nuevas tecnologías de mantenimiento predictivo, como se observa en la tabla C.1.

Concepto	Ahorros (Gs)			
	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3
Ingreso		261.144.000	261.144.000	261.144.000
Egreso	77.480.000	135.823.200	135.823.200	135.823.200
Costo de servicio de inspección	-7.480.000	7.480.000	7.480.000	7.480.000
Insumos para reparacion averias (30% facturacion)		78.343.200	78.343.200	78.343.200
Capacitación termografía y vibración	-20.000.000			
Imprevisto	-50.000.000	50.000.000	50.000.000	50.000.000
Ahorro en costo		125.320.800	125.320.800	125.320.800
Inversion	-77.480.000
Flujo neto	-77.480.000	125.320.800	125.320.800	125.320.800

Tabla C.1: Flujo de caja proyectada de las inversiones previstas.

C.1.2 Determinación de la tasa interna de rendimiento (TIR)

De acuerdo a la tabla expuesta arriba se calcula la tasa interna de rendimiento, obteniendo el siguiente resultado:

$$TIR = 152\%$$

Con la tasa de descuento = 12 % y TIR = 152% → El proyecto es rentable

C.1.3 Determinación del valor presente neto (VPN)

Teniendo en cuenta los valores obtenidos en el flujo de caja proyectada con una tasa de descuento del 12% para un período de 3 años. Aplicando la fórmula del VPN expuestas en capítulos anteriores se ha obtenido los resultados que se observa en la figura C.1.

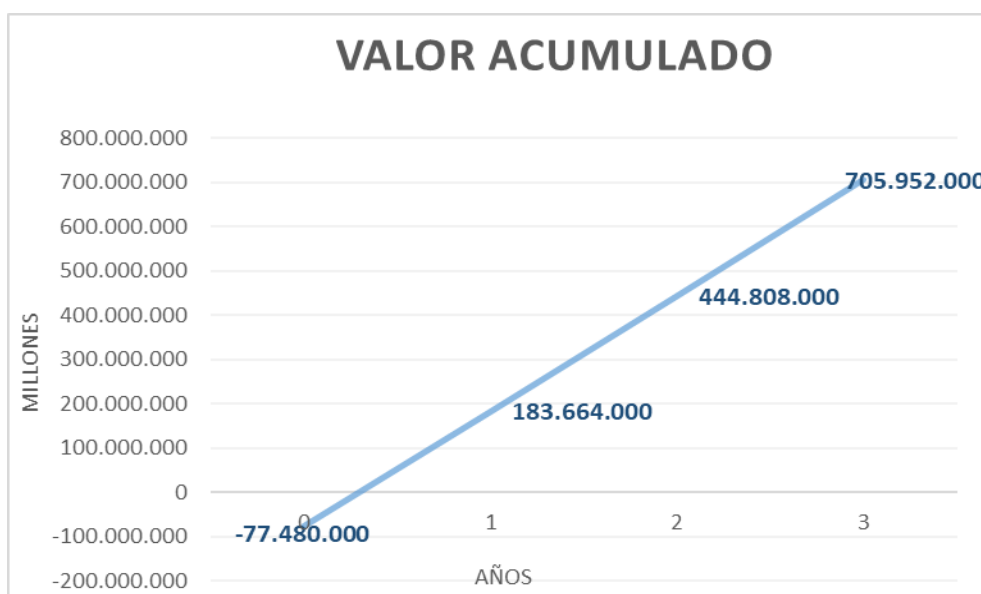


Figura C.1: Método del VPN con tasa de descuento 12%.

Esto nos indica que la inversión será recuperada en el primer año de su implementación.

El criterio de rentabilidad que se tiene en cuenta es el siguiente:

VPN < 0; No rentable.

VPN = 0; Indistinto.

$VPN > 0$; Rentable.

Aplicando la fórmula del flujo de caja proyectada para una proyección de 3 años, se obtuvo el siguiente resultado:

VPN = 300.999.416 Gs.

Al ser el $VPN > 0$, se concluye que el proyecto es rentable.

C.1.4 Determinación del periodo de la inversión (PRI)

Aplicando la fórmula expuesta en capítulos anteriores, se tuvo el siguiente resultado:

PRI	0,42
PRI	5 meses, 12 días

Tabla C.2: Tiempo de recuperación de la inversión.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] S. G. Garrido, Manual Practico para la Gestion Eficaz del Mantenimiento Industrial, Madrid, 2009-2012.
- [2] J. A. O. J. L. R. Alfonso Piñol, “Mantenimiento Predictivo de Motores de Induccion,” 2004.
- [3] H. M. Kelly A, Gestion del mantenimiento industrial, 1988.
- [4] O. G. Antonio, Sevilla España.
- [5] D. d. I. d. I. D. Tecnica, Instalacion y mantenimiento de motores electricos trifasicos, Guatemala, 2002.
- [6] S. M. Revillas, “Guia de la Termografia Infrarroja Aplicaciones en ahorro y eficiencia energetica,” Madrid.
- [7] FLIR ALAVA INGENIEROS, “Guia de termografia para mantenimiento predictivo,” Madrid, 2011.
- [8] Testo AG, “Termografia guia de bolsillo,” 2008.
- [9] A-MAG.S.A., “Tutorial de Vibraciones para mantenimiento mecanico,” Medellin, Colombia, 2005.
- [10] JPS Tecnologia en calidad , Deteccion Anticipada de Fallas en Motores Electricos, Buenos Aires , 2011.

- [11] E. P. Marin, La medición y el análisis de vibraciones en el diagnóstico de máquinas rotatorias, Cuba , 1997.
- [12] white.G, Introducción al Análisis de Vibraciones, 2010.
- [13] Trio.A, Introducción al Análisis de Vibraciones.