

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



“MANTENIMIENTO PREDICTIVO DE MOTORES ELÉCTRICOS”

Proyecto de Grado para optar el grado académico de Ingeniero Eléctrico

POR: UNIV. RONALD ERACLIO TRUJILLO FERNANDEZ

TUTOR: ING. EBER ENRIQUE LUNA MOLINA

LA PAZ – BOLIVIA

2023



**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERIA**



LA FACULTAD DE INGENIERIA DE LA UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS AUTORIZA EL USO DE LA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO SI LOS PROPÓSITOS SON ESTRICTAMENTE ACADÉMICOS.

LICENCIA DE USO

El usuario está autorizado a:

- a) Visualizar el documento mediante el uso de un ordenador o dispositivo móvil.
- b) Copiar, almacenar o imprimir si ha de ser de uso exclusivamente personal y privado.
- c) Copiar textualmente parte(s) de su contenido mencionando la fuente y/o haciendo la cita o referencia correspondiente en apego a las normas de redacción e investigación.

El usuario no puede publicar, distribuir o realizar emisión o exhibición alguna de este material, sin la autorización correspondiente.

TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS. EL USO NO AUTORIZADO DE LOS CONTENIDOS PUBLICADOS EN ESTE SITIO DERIVARA EN EL INICIO DE ACCIONES LEGALES CONTEMPLADAS EN LA LEY DE DERECHOS DE AUTOR.

**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

Proyecto de grado:

MANTENIMIENTO PREDICTIVO DE MOTORES ELÉCTRICOS

Presentado por: Univ. Ronald Eraclio Trujillo Fernandez

Para optar el grado académico de Ingeniero Eléctrico

Nota Numeral:

Nota Literal:

Ha sido aprobado como:

**Ing. Juan José Torres Obleas
Director de carrera de Ingeniería Eléctrica**

Tutor:

Ing. Eber Enrique Luna Molina

Tribunal:

Ing. Ruperto J. Aduviri Rodríguez

Ing. Raúl Leño Román

Ing. Carlos Alberto Tudela Jemio

Fecha: 11 de diciembre de 2023

Dedicatoria

A Dios, quien ha sido la fuente de sabiduría y guía en cada etapa de mi vida, reconocemos que todo lo que poseemos y cada logro que alcanzamos refleja Su voluntad y gracia hacia nosotros.

A mis padres, Eraclio Trujillo y a mi amada madre, Trinidad Fernández (†), quienes me inculcaron valores, dedicación y me enseñaron a luchar y nunca darme por vencido. Su ejemplo y legado siempre guiaran mi camino.

A mis hermanos, Cesar, Dania, Sara y Johana, por su apoyo inquebrantable y por compartir conmigo las alegrías, tristezas y desafíos de esta travesía llamada vida. Este logro es el resultado del amor y el sacrificio de mi familia, y dedico este proyecto a ustedes con todo mi corazón.

Agradecimientos

En este camino hacia la culminación de mi proyecto de grado, quiero comenzar expresando mi profundo agradecimiento a Dios por Su constante amor, guía y apoyo a lo largo de mi vida. En cada desafío y éxito, en cada alegría y tristeza, he sentido Su presencia y protección. Sus bendiciones y enseñanzas han sido mi faro en la oscuridad y mi fortaleza en la adversidad. Reconozco que todo lo que soy y todo lo que he logrado es un regalo de Su gracia.

Agradezco mi familia, quienes han sido la fuente de mi inspiración y apoyo inquebrantable a lo largo de este viaje académico.

A mi querido padre, Eraclio Trujillo y a mi amada madre, Trinidad Fernández (†), les debo mi gratitud eterna por su amor, paciencia y constante aliento. Sus valores y sabiduría han sido y serán un faro en mi vida.

A mis hermanos les agradezco por su compañía y respaldo en cada paso de este proceso. Sus palabras de aliento y ánimo fueron un motor para seguir adelante.

A mi tutor, Ing. Eber E. Luna Molina, le agradezco por el apoyo incondicional, su orientación, sabiduría y apoyo inquebrantable a lo largo de este proyecto. Su experiencia y dedicación fueron fundamentales en mi crecimiento académico.

Dar gracias a mis amigos y seres queridos, que siempre estuvieron ahí para escucharme, animarme y recordarme que el esfuerzo y la perseverancia dan sus frutos.

RESUMEN

En el presente proyecto, "Mantenimiento Predictivo de Motores Eléctricos", buscamos implementar y promover la aplicación del Mantenimiento Predictivo en la industria para maximizar la disponibilidad, confiabilidad y rendimiento de los motores eléctricos. Presentamos técnicas y herramientas avanzadas con el objetivo de mejorar la productividad, reducir los costos de mantenimiento y elevar los estándares de seguridad laboral.

Centramos nuestro análisis en los factores que afectan la vida útil de los motores eléctricos, incluyendo fallas eléctricas, mecánicas y otros factores internos y externos, y en cómo estos se manifiestan en el motor. Asimismo, abordamos la importancia de los parámetros clave en el mantenimiento de estos motores, así como la instrumentación aplicable a estos equipos.

Exploramos distintas técnicas de Mantenimiento Predictivo, como termografía, análisis de vibraciones y pruebas estáticas, para detectar y prevenir fallas anticipadamente con la ayuda de estas técnicas y elementos de monitoreo. Además, realizamos un análisis predictivo con datos reales obtenidos de tareas de monitoreo predictivo en un grupo de motores de una empresa cementera, aplicando la teoría expuesta en el proyecto con la ayuda de los programas específicamente desarrollados para este fin.

El resultado es una guía para implementar el Mantenimiento Predictivo en motores eléctricos de inducción. Mostramos la evolución a lo largo del tiempo después de aplicar la metodología, resaltando la efectividad de este enfoque. Este conjunto de temas, técnicas y metodología nos capacita para abordar de manera efectiva la implementación del Mantenimiento Predictivo, reconociendo los beneficios significativos que puede aportar a la industria.

CONTENIDO

RESUMEN.....	V
CONTENIDO.....	VI
CONTENIDO DE FIGURAS.....	X
CONTENIDO DE TABLAS.....	XII
CONTENIDO DE ECUACIONES.....	XIII
CONTENIDO DE GRÁFICAS.....	XIV
CAPÍTULO 1 - INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Planteamiento del problema.....	1
1.3 Objetivos.....	2
1.3.1 Objetivo general.....	2
1.3.2 Objetivos específicos.....	2
1.4 Justificación.....	3
1.5 Alcances y limitaciones del proyecto.....	4
CAPÍTULO 2 - MARCO TEÓRICO.....	6
2.1 Mantenimiento Industrial.....	6
2.1.1 Historia del mantenimiento Industrial.....	6
2.1.1.1 Evolución del mantenimiento.....	6
2.2 Función del mantenimiento.....	8
2.3 Terminología utilizada en el mantenimiento.....	9
2.3.1 Norma EN 13306.....	9
2.3.2 Norma NB 12017.....	9
2.4 Tipos de mantenimiento.....	9
2.4.1 Mantenimiento Correctivo (CM).....	10
2.4.2 Mantenimiento Preventivo (PM).....	11
2.4.3 Mantenimiento Predictivo (PdM).....	12
2.5 Comparación de los Diferentes Tipos de Mantenimiento.....	13
2.6 Complemento el Mantenimiento Predictivo: El enfoque Proactivo de mantenimiento.....	14
2.7 Técnicas organizativas de Gestión de Mantenimiento.....	15

2.7.1	TPM (Total Productive Maintenance).....	15
2.7.1.1	Antecedentes Históricos y Objetivos del TPM.....	15
2.7.1.2	Las “Cinco S” y el TPM.....	16
2.7.2	RCM (Reliability Centered Maintenance).....	17
2.7.2.1	Antecedentes Históricos y Objetivos del RCM.....	17
2.7.2.2	Norma SAE JA1011 y el RCM.....	18
2.7.3	El Análisis de Criticidad y las técnicas organizativas del mantenimiento.....	19
2.7.4	El TPM y el RCM como bases estratégicas del Mantenimiento Predictivo.....	20
2.8	Motores Eléctricos.....	20
2.8.1	Tipos de motores eléctricos.....	20
2.8.1.1	Motores eléctricos de corriente alterna.....	21
2.8.2	Principio de funcionamiento del motor eléctrico de CA.....	22
2.8.3	Partes constructivas de motor de CA.....	22
2.8.3.1	Estator.....	22
2.8.3.2	Rotor.....	24
2.8.3.3	Ventilador.....	25
2.8.3.4	Carcasa.....	26
2.8.3.5	Borneras.....	26
2.8.3.6	Rodamientos en motores eléctricos.....	27
2.8.3.7	Placa característica.....	30
2.8.4	Características (variables) técnicas de motores eléctricos.....	31
2.8.4.1	Métodos de refrigeración de un motor eléctrico.....	31
2.8.4.2	Régimen de servicio.....	36
2.8.4.3	Eficiencia.....	36
2.8.4.4	Grado de protección.....	38
2.8.4.5	Clase de aislamiento.....	39
2.8.4.6	Factor de Servicio (FS).....	40
2.8.4.7	Parámetros Ambientales.....	40
CAPÍTULO 3 - INGENIERÍA DEL PROYECTO.....		42
3.1	El motor eléctrico de inducción en la industria como caso de estudio.....	42
3.2	Degeneración de los equipos y el motor eléctrico.....	42

3.3 Factores que afectan la vida útil del motor	43
3.4 Tipos de falla en motores eléctrico	43
3.4.1 Fallas eléctricas – aislamiento	43
3.4.1.1 Corto circuito	43
3.4.1.2 Anormalidades eléctricas	44
3.4.2 Fallas mecánicas	48
3.4.2.1 Sobrecarga mecánica	48
3.4.2.2 Desalineación	48
3.4.2.3 Desequilibrio del eje	50
3.4.3 Fallas por factores externos	54
3.4.4 Fallas por factores internos	54
3.4.4.1 Fallas en los componentes del motor	54
3.5 Causas de falla en motores eléctricos	57
3.6 Modos y efectos de fallas en motores eléctricos	59
3.7 Parámetros importantes de un motor eléctrico para un adecuado mantenimiento	61
3.8 Instrumentación aplicable a los motores eléctricos	61
3.8.1 Clasificación de los instrumentos	61
3.8.1.1 Instrumentos de Medición	63
3.8.1.2 Instrumentos de Control	68
3.8.2 Control de motores eléctricos de inducción	69
3.9 El Mantenimiento Predictivo en la Industria	70
3.10 Beneficios del Mantenimiento Predictivo	70
3.11 Estrategias de mantenimiento predictivo (PdM)	71
3.11.1 Técnicas y herramientas aplicables en el mantenimiento predictivo (PdM)	74
3.11.1.2 Termografía	75
3.11.1.3 Análisis de Vibraciones	79
3.11.1.4 Pruebas estáticas	83
3.11.1.5 Pruebas Dinámicas	96
3.12 Elementos de un sistema de monitoreo para el mantenimiento predictivo	97
3.12.1 Sistemas de comunicación industriales	97
3.12.2 Protocolos de comunicación	98

3.12.3	Sistemas de supervisión y control	99
3.12.3.1	Sistemas SCADA	100
3.12.3.4	Sistema DCS	101
3.13	Indicadores de Mantenimiento Aplicables en el PdM.....	103
3.13.1	Análisis de criticidad – Índice de Criticidad	104
3.13.2	Indicadores – MTTR y MTBF	104
3.14	El PdM y el análisis del origen de la degeneración hacia posibles fallas.....	106
CAPÍTULO 4 – APLICACIÓN DEL PDM A MOTORES ELÉCTRICOS DE INDUCCIÓN..		108
4.1	Metodología para la implementación del PdM.....	108
4.2	Aplicación del análisis de Criticidad.....	109
4.3	Evaluación y selección de técnicas de monitoreo	115
4.3.1	Análisis de Datos de vibraciones - motores eléctricos (Área molino de cemento) ..	115
4.3.1.1	Datos de vibraciones obtenidos	115
4.3.2	Análisis de Datos de Termografía	127
4.4	Diagnóstico y acciones correctivas realizadas en puntos críticos.	132
4.4.1	Mantenimiento motor principal 531.MD140.M01	132
4.5	Análisis con los Indicadores de Desempeño MTBF y MTTR.	136
CAPÍTULO 5 - CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		140
5.1	Conclusiones Generales.....	140
5.2	Conclusiones específicas sobre el proyecto.....	140
5.3	Conclusiones sobre la Aplicación del Proyecto.....	140
5.4	Recomendaciones	141
BIBLIOGRAFÍA.....		142
GLOSARIO.....		144
ANEXOS.....		148

CONTENIDO DE FIGURAS

Figura 2.1 Medios y Objetivos en la historia del Mantenimiento.	8
Figura 2.2 Ley de Degradación Desconocida.....	10
Figura 2.3 Ley de Degradación Conocida.	11
Figura 2.4 Curva P-F	12
Figura 2.5 Proceso de mantenimiento centrado en confiabilidad.....	19
Figura 2.6 Tipos de Motores Eléctricos.....	21
Figura 2.7 Partes del estator	23
Figura 2.8 Tipos de rotor en motores de inducción.....	24
Figura 2.9 Vista en conjunto y seccionada de un motor asíncrono	25
Figura 2.10 Refrigeración de motor eléctrico por flujo aire – ventilador acoplado al motor.....	25
Figura 2.11 Refrigeración de motor eléctrico por flujo aire – ventilador auxiliar	25
Figura 2.12 Caja de bornes y bornera de motor eléctrico.....	26
Figura 2.13 Rodamientos para motores Eléctricos	27
Figura 2.14 tipos de rodamientos.	28
Figura 2.15 Carga radial y axial en rodamientos.....	28
Figura 2.16 Angulo de contacto en Rodamientos.....	29
Figura 2.17 Nomenclatura de rodamientos.....	30
Figura 2.18 Placa característica de motores eléctricos	30
Figura 2.19 Datos de placa característica de motores eléctrico.....	31
Figura 2.21 Motor sin ventilador.....	32
Figura 2.22 Refrigeración de motor por ventilador solidario al eje	33
Figura 2.23 Refrigeración de motor por ventilador auxiliar.....	33
Figura. 2.24 Refrigeración de motores eléctricos por aire indirecta (IC611).....	34
Figura. 2.25 Refrigeración de motores eléctricos por aire indirecta (IC616).....	34
Figura. 2.26 Refrigeración de motores eléctricos por aire indirecta (IC666).....	35
Figura. 2.27 Refrigeración de motores eléctricos por aire – agua (IC31W).....	35
Figura.2.28 Clases de eficiencia de motores eléctricos	37
Figura.2.29 Tipo de código en grado de protección IP.	38
Figura.2.30 Grados de Protección IP de motores abiertos y cerrados.....	39

Figura.2.31 Composición de la temperatura en función de la clase de aislamiento.....	40
Figura 3.1 Curva de Degeneración de un equipo.	42
Figura 3.2 Distorsión armónica	45
Figura 3.3 Dibujo esquemático de un motor mostrando el fenómeno eléctrico fluting.	46
Figura 3.4 Fluting - Erosión eléctrica en rodamientos	47
Figura 3.5 Desalineación de motores eléctricos	49
Figura 3.6 Tipos de excentricidad en motores eléctricos.	51
Figura 3.7 Mala instalación de Motor eléctrico.....	52
Figura 3.8 Clasificación SFK – Modos de Falla de Rodamientos.....	52
Figura 3.9 Clasificación SFK – Modos de Falla de Rodamientos.....	53
Figura 3.10 Fallas en el motor eléctrico.	55
Figura 3.11 Falla en el motor eléctrico.....	57
Figura.3.12 Curvas R vs T de los tipos de RTD.....	64
Figura.3.13 RTD- Tipos de cableado según su número de hilos.....	65
Figura.3.14 Estructura de los RTDs.	65
Figura.3.15 Acelerómetro piezoeléctrico aplicado a el motor eléctrico	68
Figura.3.16 Flujograma del mantenimiento predictivo	73
Figura.3.17 Termografía infrarroja en equipos eléctricos.	75
Figura.3.18 Radiación infrarroja en el espectro de onda.....	77
Figura.3.19 Radiación infrarroja en el espectro de onda.....	78
Figura.3.20 Valores de vibración relacionados a fallas.....	80
Figura.3.21 Rango de vibraciones limites permisibles, ISO 10816-3.	81
Figura.3.22 Puntos para la toma de datos de vibraciones en motores eléctricos.....	82
Figura 3.23 Puente Kelvin - Prueba de desbalanceo	85
Figura 3.24 Circuito equivalente mostrando las cuatro corrientes monitoreadas durante una prueba de resistencia de aislamiento.....	86
Figura 3.25 Coeficiente de resistencia de aislamiento aproximado KT ,	89
Figura 3.26 Rigidez dieléctrica del aislamiento (V vs. T).....	92
Figura 3.27 – a. Formas de onda Típicas en la Prueba Surge.....	94
Figura 3.27 – b. Formas de onda cortocircuito en bobinado - Prueba Surge	95
Figura 3.28 Tiempo de subida del pulso aplicado - Prueba Surge	95

Figura 3.29 Tiempo de subida del pulso aplicado - Prueba Surge	96
Figura.3.30 Los 5 niveles de automatización	97
Figura.3.31 Diagrama básico de un sistema SCADA.....	101
Figura.3.32 Arquitectura típica de un sistema DCS.	102
Figura 3.33 Etapa de aplicación del análisis de criticidad.....	104
Figura 3.34 MTBF y MTTR.....	105
Figura 3.35 Curva del Ciclo de Vida y Tasa de Tallas.....	106
Figura 4.1 Matriz de Criticidad por Análisis de Riesgo	111
Figura 4.2 Medición de resistencia de de bobinas – motor 531.MD140.M01	134
Figura 4.3 Medidas de DAR/IP motor 531.MD140.M01	135
Figura 4.4 Prueba HIPOT - motor 531.MD140.M01	135
Figura 4.5 Prueba surge con anillas conectadas - motor 531.MD140.M01	136
Figura 4.6 Prueba surge con anillas desconectadas - motor 531.MD140.M01	136

CONTENIDO DE TABLAS

Tabla 2.1 Comparación tipos de Mantenimiento.....	13
Tabla 2.2 Las 5s del TPM.....	16
Tabla 2.3 Partes del Estator	23
Tabla 2.4 Datos de placa característica de motores eléctrico.	31
Tabla 2.5 Régimen de servicio de motores eléctricos	36
Tabla 2.6 Grados de Protección IP (números característicos).....	38
Tabla 2.7 Clase de Aislamiento.....	39
Tabla 2.8 Manejo de la temperatura con la reducción de la potencia del motor.	41
Tabla 3.1 Causas de Falla en Motores Eléctricos.....	58
Tabla 3.2 Modos y Efectos de Falla en Motores Eléctricos	59
Tabla 3.3 Instrumentos utilizado en Motores Eléctricos.	62
Tabla 3.4 Dispositivos de medición de temperatura.....	63
Tabla 3.5 Dispositivos de medición de temperatura.....	66
Tabla 3.6 Tipos de Sensores de Vibración.	67
Tabla 3.7 Tipos de Control de velocidad, arranque y paro.....	69

Tabla 3.8 Estrategias del PdM.....	72
Tabla 3.9 Técnicas y herramientas aplicables en el PdM.....	74
Tabla 3.10 Pruebas Eléctricas Estáticas en Máquinas Rotativas.....	84
Tabla 3.11 Porcentaje de Desbalanceo Resistivo	85
Tabla 3.12 Voltajes de CC que se aplicarán durante la prueba de resistencia de aislamiento. ...	87
Tabla 3.13 Resistencia de Aislamiento Mínima Recomendada	88
Tabla 3.14 Valores típicos para el Índice de Polarización y Absorción.....	90
Tabla 3.15 Elección entre Índice de Polarización y Absorción.....	91
Tabla 3.16 Niveles de automatización industrial.....	98
Tabla 3.17 Protocolos de comunicación más utilizados en la industria	99
Tabla 3.18 Indicadores claves de desempeño (KPIs)	103
Tabla 3.19 Análisis de degeneración de Motores Eléctricos.....	107
Tabla 4.1 Metodología de Análisis Predictivo de Motores Eléctricos	108
Tabla 4.2 Análisis de Criticidad de Equipos por Riesgo.....	110
Tabla 4.3 Niveles de criticidad.....	111
Tabla 4.4 Datos obtenidos de la Criticidad de los equipos.....	113
Tabla 4.5 Valores globales de Criticidad.....	113
Tabla 4.6 Equipos seleccionados para análisis Predictivo	115
Tabla 4.7 Datos obtenidos de DAR/IP antes mto. - motor 531.MD140.M01	132
Tabla 4.8 Datos obtenidos de DAR/IP después de Mto. - motor 531.MD140.M01	133
Tabla 4.9 Tiempo de Funcionamiento del Área de Molienda	137
Tabla 4.10 Lista de equipos en estudio con datos calculados de MTBF Y MTTR.....	138

CONTENIDO DE ECUACIONES

Ecuación 2.1 Eficiencia motor eléctrico.....	37
Ecuación 3.1 Ecuación de Planck.....	76
Ecuación 3.2 Ecuación de Estefan – Boltzmann	76
Ecuación 3.3 Señal de vibración en amplitud.....	79
Ecuación 3.4 Velocidad instantánea - punto en movimiento vibratorio armónico simple	80
Ecuación 3.5 Aceleración instantánea - punto en movimiento vibratorio armónico simple	80

Ecuación 3.6 Porcentaje de desbalanceo resistivo.....	85
Ecuación 3.7 Corriente de absorción.....	87
Ecuación 3.8 Coeficiente K_T para el cálculo de la resistencia de aislamiento.....	88
Ecuación 3.9 Corrección de la resistencia de aislamiento.....	89
Ecuación 3.10 Índice de Polarización (IP).....	90
Ecuación 3.11 Índice de Absorción (IA).....	90
Ecuación 3.12 Tensión máxima a aplicar prueba HIPOT.....	93
Ecuación 3.13 Calculo de la frecuencia.....	94
Ecuación 3.14 Calculo del periodo.....	94
Ecuación 3.15 Calculo de MTTR.....	105
Ecuación 3.16 Calculo del MTBF.....	105
Ecuación 4.1 Calculo del Riesgo.....	109
Ecuación 4.2 Cálculo de la Consecuencia.....	109

CONTENIDO DE GRÁFICAS

Gráfico 4.1 Porcentaje de equipos agrupados según su Criticidad.....	114
Gráfico 4.2 Porcentaje de criticidad de motores.....	114
Gráfico 4.3 Valores medidos de Vibraciones Globales (2018-2019).....	117
Gráfico 4.4 Valores medidos de Vibraciones Globales (2022-2023).....	118
Gráfico 4.5 HeatMap de valores medidos de Vibraciones Globales motor 531.MD150.....	119
Gráfico 4.6 Comparación Valores promedios de Vibraciones Globales motor 531.MD150.....	120
Gráfico 4.7 Subplots de Vibraciones Globales por puntos – motor 531.MD150 (2018-2019) ...	121
Gráfico 4.8 Subplots de Vibraciones Globales por puntos – motor 531.MD150(2022-2023) ...	122
Gráfico 4.9 Diagrama de caja-Vibraciones Globales motor531.MD140(2018-2019).....	123
Gráfico 4.10 HeatMap -Vibraciones Globales motor 531.MD140(2018-2019).....	123
Gráfico 4.11 Valores promedios de Vibraciones Globales motor 531.MD140 (2018-2019).....	124
Gráfico 4.12 Subplots de Vibraciones Globales por puntos – 531.MD140 (2018-2019).....	124
Gráfico 4.13 Diagrama de caja - Vibraciones Globales – 531.MD140 (2022-2023).....	125
Gráfico 4.14 HeatMap -Vibraciones Globales motor 531.MD140(2022-2023).....	125
Gráfico 4.15 Valores promedios de Vibraciones Globales motor 531.MD140 (2022-2023).....	126

Gráfico 4.16 Subplots de Vibraciones Globales por puntos – 531.MD140 (2018-2019).....	126
Gráfico 4.17 Subplots de datos de Termografía para motores críticos (2018 – 2019).....	128
Gráfico 4.18 Subplots de datos de Termografía para motores críticos (2022 - 2023)	129
Gráfico 4.19 Histograma de distribución de temperaturas – motor 531.MD140.M01	130
Gráfico 4.20 Valores promedios de temperaturas en motor 531.MD140.M01	130
Gráfico 4.21 Curvas de temperatura por tipo de datos – motor 531.MD140.M01	131
Gráfico 4.22 Curvas del comportamiento térmico – motor 531.MD140.M01.....	131
Gráfico 4.23 Histograma de fallas y tiempo de inactividad por motor	139
Gráfico 4.24 Histograma MTBF y MTTR para los motores en estudio	139

Capítulo 1 - INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

En las últimas décadas, los motores eléctricos han desempeñado un papel fundamental en numerosas industrias, siendo la columna vertebral de la producción moderna. En particular los motores eléctricos de inducción han destacado por su simplicidad, robustez y eficiencia, convirtiéndose en una opción popular en diversos sectores. Sin embargo, para garantizar un rendimiento óptimo y prolongar la vida útil de estos motores se requiere un mantenimiento adecuado. Los métodos tradicionales de mantenimiento, que a menudo implican costosos periodos de inactividad y revisiones rutinarias, no han logrado satisfacer las necesidades de detección temprana de problemas. En este escenario, el mantenimiento predictivo surge como una solución innovadora y prometedora.

En la actualidad, la industria reconoce más que nunca en la importancia de adoptar diversas técnicas de mantenimiento en sus equipos o sistemas de fabricación para lograr un tiempo de inactividad cercano a cero. Este cambio de paradigma¹, del enfoque tradicional de reparación de fallas, al mantenimiento predictivo, ha despertado gran interés debido a los beneficios que aporta al rendimiento de los equipos y la mejora sustancial en el área de mantenimiento industrial. Los equipos y sistemas de pronóstico desempeñan un papel fundamental en este nuevo enfoque, ya que permiten estimar de manera precisa el estado y la degradación de las máquinas, respaldando firmemente la política de Mantenimiento Predictivo, impulsando la eficiencia y la confiabilidad en los procesos industriales.

1.2 Planteamiento del problema

En un mundo industrial altamente competitivo, las empresas se esfuerzan por alcanzar la mayor productividad posible y maximizar sus recursos involucrados. En el entorno empresarial actual, contar con equipos eficientes y confiables es crucial para garantizar la productividad en los diversos

¹ RAE. Teoría o conjunto de teorías cuyo núcleo central se acepta sin cuestionar y que suministra la base y modelo para resolver problemas y avanzar en el conocimiento.

sectores industriales. Sin embargo, muchas empresas aun dependen de enfoques de mantenimiento tradicionales que no logran detectar y prevenir de manera efectiva las fallas, lo que resulta en desafíos y problemas significativos.

La falta de un sistema de mantenimiento predictivo en el contexto de los motores eléctricos conlleva diversas problemáticas. En primer lugar, la ausencia de detección temprana de fallas en los motores eléctricos puede provocar paros inesperados, interrupciones en la producción y pérdidas económicas significativas. Además, otros métodos de mantenimiento como el correctivo o preventivo que son ampliamente utilizados no garantizan una detección temprana de los problemas que podrían afectar el rendimiento de los motores eléctricos, donde las fallas inesperadas y los costos asociados son de gran preocupación.

También cabe mencionar que, en el contexto de nuestra industria, existe una falta de conocimiento y aplicación específica del mantenimiento predictivo de motores eléctricos. Es necesario abordar esta problemática y explorar cómo se podría implementar de manera efectiva el mantenimiento predictivo en nuestra organización, considerando las características propias de nuestros motores eléctricos y las limitaciones existentes.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Introducir y promover la implementación del Mantenimiento Predictivo en los motores eléctricos de inducción, a través de la presentación de técnicas y herramientas avanzadas utilizadas en la industria. Nuestro propósito es maximizar la disponibilidad, confiabilidad y el rendimiento de los motores eléctricos, buscando destacar la importancia y los beneficios significativos que el mantenimiento predictivo puede aportar a la industria.

1.3.2 Objetivos específicos

- Analizar los factores que afectan la vida útil de los motores eléctricos de inducción y su relación con las fallas más comunes.
- Evaluar la instrumentación y los parámetros relevantes que coadyuban en un adecuado mantenimiento de los motores eléctricos de inducción.

- Explorar el concepto y los beneficios del Mantenimiento Predictivo en la industria, centrándose en su aplicación a los motores eléctricos de inducción.
- Investigar las estrategias, técnicas y herramientas específicas del Mantenimiento Predictivo aplicables a los motores eléctricos de inducción, como la termografía, el análisis de vibraciones y las pruebas estáticas.
- Analizar los elementos esenciales de un sistema de monitoreo para el Mantenimiento Predictivo y su contribución a la detección temprana de fallas.
- Evaluar los indicadores de mantenimiento aplicables al Mantenimiento Predictivo, como el MTTR (tiempo medio de reparación) y el MTBF (tiempo medio entre fallas).
- Introducir la aplicación del Mantenimiento Predictivo en motores eléctricos de inducción, describiendo los pasos y análisis, aplicando los conocimientos adquiridos, y presentar resultados preliminares para ilustrar el progreso en el proceso de implementación.

1.4 Justificación

La implementación del Mantenimiento Predictivo en nuestra industria es esencial para optimizar la productividad, reducir costos, mejorar la seguridad laboral y promover el desarrollo tecnológico. Centrarnos en los motores eléctricos de inducción como base de estudio nos permite comprender y aplicar de manera específica el mantenimiento predictivo, enfocándonos en los motores más ampliamente utilizados en la industria y que experimentan un crecimiento constante en su aplicabilidad.

En la actualidad, las empresas dedicadas al rubro industrial tratan de implementar tecnologías de mantenimiento con el objetivo de evitar paros inesperados que provoquen pérdidas en producción. El Mantenimiento Predictivo nos permite anticiparnos a la ocurrencia de fallas mediante la aplicación de técnicas y herramientas de monitoreo, y el análisis de datos. Al prevenir las fallas, aumentamos la disponibilidad de los equipos y mejoramos su confiabilidad, evitando eventos no deseados que podrían tener un impacto negativo en la operación.

Además, al reducir los tiempos de inactividad no planificados y aumentar la confiabilidad de los motores, las empresas logran una mayor eficiencia operativa y optimizan los recursos disponibles. Esto se traduce en una disminución de los costos de mantenimiento y en la maximización del

rendimiento de los activos, lo que permite que los equipos funcionen de manera eficiente² y efectiva³, incluso en situaciones complejas.

Es fundamental comprender y entender que la implementación de una técnica de mantenimiento no solamente se basa en conocer los diferentes tipos de mantenimiento existentes, sino también de acompañarla con una correcta aplicación de acuerdo a las necesidades específicas de la empresa y la industria.

1.5 Alcances y limitaciones del proyecto

Alcances

1. Enfoque en motores eléctricos de inducción: El proyecto se centrará específicamente en el análisis y la aplicación del mantenimiento predictivo en los motores eléctricos de inducción, considerando su importancia y amplia utilización en la industria.
2. Análisis de fallas y diagnóstico: Se abordarán las posibles fallas que pueden ocurrir en los motores eléctricos de inducción, tanto desde el punto de vista eléctrico como mecánico. Se presentarán técnicas de análisis y diagnóstico para identificar los modos y efectos de falla, permitiendo una detección temprana y una intervención oportuna.
3. Implementación teórica: El proyecto se enfocará en brindar una base teórica sólida sobre el mantenimiento predictivo y su aplicación en los motores eléctricos de inducción. Se explorarán las técnicas, herramientas y metodologías relevantes, proporcionando una comprensión completa de los conceptos y principios involucrados.
4. Introducción Práctica: El proyecto describirá los pasos y análisis clave necesarios para una implementación efectiva bajo la metodología propuesta con datos reales, presentando ejemplos y tareas realizadas de mantenimiento.

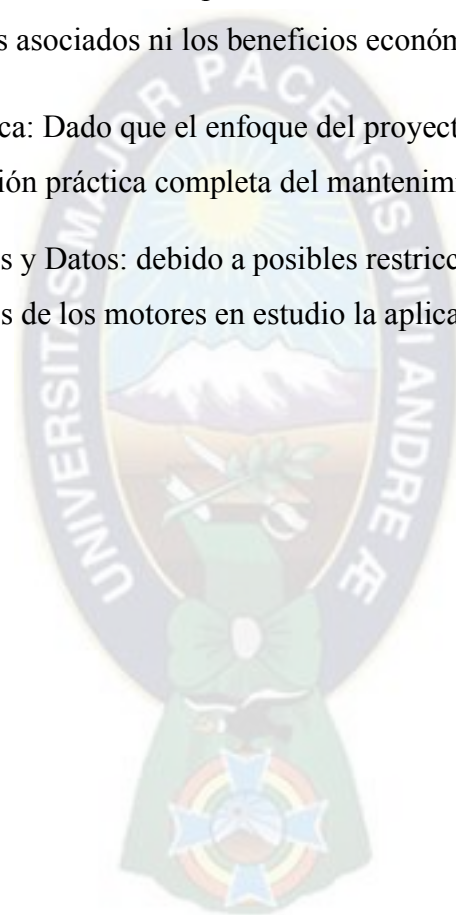
² Que tiene eficiencia.

Eficiencia. Capacidad de lograr lo deseado con el mínimo posible de recursos.

³**Efectiva.** Haciendo referencia a la capacidad de lograr resultados satisfactorios y exitosos al mejorar la confiabilidad y reducir los tiempos de inactividad.

Limitaciones

1. No se abordarán todos los aspectos relacionados: Debido a la amplitud y complejidad del tema, es posible que no se puedan abordar todos los aspectos y técnicas específicas del mantenimiento predictivo en los motores eléctricos de inducción. Se priorizarán aquellos aspectos más relevantes y fundamentales para brindar una comprensión general.
2. No se evaluará la viabilidad económica: El proyecto se centrará en los fundamentos teóricos y técnicos del mantenimiento predictivo, sin evaluar la viabilidad económica. No se analizarán los costos asociados ni los beneficios económicos que podrían obtenerse.
3. Implementación práctica: Dado que el enfoque del proyecto es teórico, no se llevará a cabo una implementación práctica completa del mantenimiento predictivo.
4. Limitación de Recursos y Datos: debido a posibles restricciones de recursos y calidad de datos reales disponibles de los motores en estudio la aplicación completa está sujeta a limitaciones.



Capítulo 2 - MARCO TEÓRICO

2.1 Mantenimiento Industrial

El mantenimiento industrial se puede llegar a definir como un conjunto de procedimientos los cuales realizamos con la finalidad de tener todo activo (equipo, maquinaria, instalación de una planta, etc.) en óptimas condiciones, garantizando el correcto funcionamiento del proceso de producción industrial [1].

Definimos habitualmente *mantenimiento* como el conjunto de técnicas destinado a conservar equipos e instalaciones en servicio durante el mayor tiempo posible (buscando la más alta disponibilidad) y con el máximo rendimiento [2].

2.1.1 Historia del mantenimiento Industrial

A lo largo de la historia, el ser humano ha reconocido la importancia del mantenimiento para asegurar el funcionamiento óptimo de sus herramientas y equipos. Desde tiempos remotos, se ha aplicado el mantenimiento de forma rudimentaria, con enfoques basados en la inspección visual y la reparación de averías evidentes.

2.1.1.1 Evolución del mantenimiento

Con el paso de los años, el mantenimiento industrial ha evolucionado junto con los avances tecnológicos, adaptándose a las necesidades cambiantes de la industria. A pesar de que no exista una frontera clara entre las etapas que sufre el mantenimiento, esto debido a diferentes factores, siendo una de las principales causas que cada sector industrial evoluciona de acuerdo a sus necesidades y de forma diferente. Se ha convenido en que la evolución del mantenimiento durante siglo XX ha tenido tres etapas, a las que llamaremos a partir de ahora Primera, Segunda y Tercera generación [3].

2.1.1.1.1 Primera Generación

La primera generación del mantenimiento cubre el periodo aproximado entre 1930 - 1950 o hasta la Segunda Guerra Mundial (1945) [3]. En esos días la industria no estaba muy mecanizada, se

contaba con maquinaria sencilla, que era fácil de reparar y los periodos de parada no eran de mucha importancia, no necesitando sistemas complicados de mantenimiento y personal calificado [4]. Las actividades de mantenimiento se enfocaba a reparar aquello que se averiaba [3].

2.1.1.1.2 Segunda Generación

Tras la Segunda Guerra Mundial, la mecanización se incrementó considerablemente, llevando a la construcción de máquinas cada vez más complejas[4]. Esto generó una dependencia de la industria hacia estas máquinas. Para evitar tiempos improductivos críticos, surgió el concepto del mantenimiento preventivo, que se basaba en revisiones periódicas de la maquinaria a intervalos fijos[4]. El objetivo era lograr la máxima durabilidad de los equipos, un rendimiento óptimo y costos más bajos. Se implementaron revisiones cíclicas, reparaciones instantáneas en caso de fallas y mantenimiento preventivo rutinario [3]

2.1.1.1.3 Tercera Generación

En la Tercera Generación del mantenimiento, que surgió a partir de mediados de los años setenta, se produjo un cambio acelerado en la industria[4]. Esta generación se enfoca en la disponibilidad y confiabilidad de los equipos, así como en la optimización de costos, aspectos ya abordados en la Segunda Generación. Sin embargo, también se consideran otros aspectos como el aumento de la seguridad, el incremento de la calidad y la protección del medio ambiente[3], los cuales se vuelven cruciales en las actividades de mantenimiento. Se destaca el auge de la calidad de los servicios de mantenimiento, respaldado por la publicación de normas ISO 9000 en 1984, orientadas a empresas de servicios, y la norma ISO 14000 para la protección medioambiental.

La filosofía de la Tercera Generación se aleja de las tareas preventivas rutinarias y se centra en un enfoque más proactivo, interviniendo en los equipos e instalaciones solo cuando sea necesario de manera eficiente y rentable. Surgieron nuevas prácticas de mantenimiento, como el mantenimiento según la condición del equipo, así como otras técnicas como RCM (Reliability Centered Maintenance) y TPM (Total Productive Maintenance), que intentan introducirse en la industria.

Figura 2.1 Medios y Objetivos en la historia del Mantenimiento.



Fuente: Francisco Javier Gonzáles Fernández. *Teoría y Práctica del Mantenimiento Industrial Avanzado*. Pág. 30.

2.2 Función del mantenimiento

El enfoque de la función de mantenimiento es asegurar que todos los activos de la empresa cumplan y continúen cumpliendo con la función de diseño del activo [5].

El mantenimiento industrial tiene como función principal mantener tres aspectos importantes en equilibrio las cuales son: Disponibilidad, confiabilidad y seguridad a lo largo de su ciclo de vida del activo.

2.2.1 Objetivos de la Función de Mantenimiento

Los principales objetivos de la función de mantenimiento son el de maximizar la disponibilidad de toda maquinaria y equipo para la producción, así también el de tratar de evitar el deterioro de los mismos, preservando el valor de las instalaciones [6].

2.3 Terminología utilizada en el mantenimiento.

Con la finalidad de aclarar al lector los términos utilizados en el mantenimiento industrial, dejar de lado una mala interpretación de los mismos, y los cuales serán ampliamente utilizados en este proyecto; damos a conocer un compendio de los términos más utilizados, así como su significado tomando como base normas aplicadas en este campo y citando cada una de ellas para conocimiento de los lectores ya que estas son poco conocidas.

2.3.1 Norma EN 13306

Norma Europea denominada “Terminología del Mantenimiento” y aprobada en marzo de 2021 por el Comité Europeo de Normalización (CEN), que tiene la finalidad de “definir los términos genéricos usados en todos los tipos de mantenimiento y en la gestión del mantenimiento, independiente del tipo de elemento considerado, con la excepción de los programas informáticos” [7], con un contenido de diversas definiciones respecto a fallos, tipos de mantenimiento y estrategias, actividades de mantenimiento, tiempos, entre otros. Además, debemos tomar en cuenta que las normas EN son normas estándares europeas.

2.3.2 Norma NB 12017

La norma NB 12017 – “Sistema de Gestión de mantenimiento – Requisitos.”, no siendo una norma creada específicamente sobre terminología presenta en su capítulo 4 – TÉRMINOS Y CONDICIONES, un conjunto de términos utilizados en el mantenimiento los cuales son detallados de manera concisa y clara.

El objetivo de esta norma es de promover buenas prácticas en la gestión de mantenimiento con el propósito de permitir que la vida de los objetos de la organización, sea conservada más allá de su vida útil [8].

2.4 Tipos de mantenimiento

A pesar de que se maneja varios tipos de mantenimiento en el ámbito industrial, estos con diferentes nombres y adecuadas a sus necesidades de cada industria, son tres las más importantes y las que llegan a ser las más utilizadas: el mantenimiento correctivo, preventivo y predictivo.

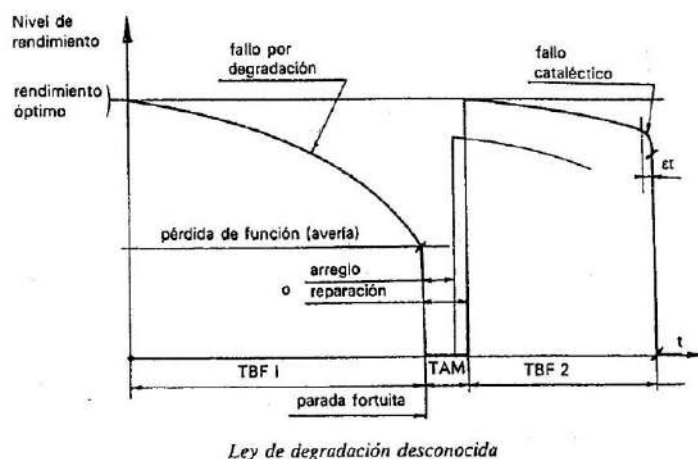
Debemos considerar que estos tipos de mantenimiento son metodologías tecnológicas o mantecnología⁴ a utilizarse como herramientas.

2.4.1 Mantenimiento Correctivo (CM)

Siendo el primer tipo de mantenimiento utilizado en la industria, este se basa específicamente en las tareas de resolución de problemas de funcionamiento del activo que puede o ha provocado un paro en la producción o funcionamiento de un equipo. Las tareas de reparación en el mantenimiento correctivo no son programadas y tienen la finalidad de restaurar o sustituir el equipo cuando se verifica que la misma no está en condiciones de seguir operando o dejó de operar [9], teniendo en cuenta que se debería contar con un remplazo del mismo para su sustitución.

El mantenimiento correctivo puede ser aplicado a equipos que tengan un funcionamiento complejo o que sea conveniente su remplazo antes de su reparación; normalmente componentes electrónicos o en equipos en los que es imposible predecir los fallos, como también en procesos que permitan su interrupción en cualquier momento, sin afectar la seguridad [10].

Figura 2.2 Ley de Degradación Desconocida.



Fuente: François Monchy, *Teoría y Practicas del Mantenimiento Industrial*. Pág. 39.

⁴ Mantecnología, termino que representa a la técnica del mantenimiento predictivo como una herramienta utilizada para la representación de las tareas de mantenimiento realizadas en un mantenimiento programado.

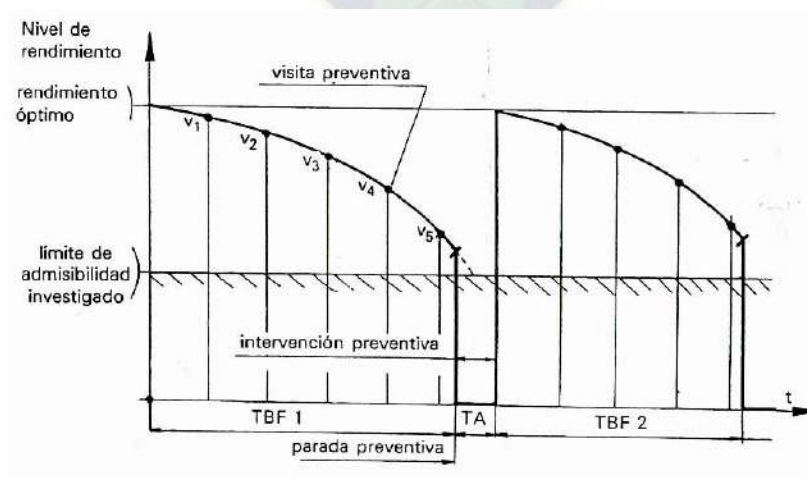
2.4.2 Mantenimiento Preventivo (PM)

El mantenimiento preventivo surgió en la industria como respuesta a la necesidad de evitar paros inesperados causados por fallos en los equipos que conlleva a realizar un mantenimiento correctivo en momentos críticos. Estos fallos repentinos pueden provocar incidentes y daños importantes que requieren un tiempo considerable en su solución, ocasionando pérdidas importantes para la empresa.

La implementación de un mantenimiento preventivo se basa en un cambio fundamental, pasando de un enfoque puramente correctivo a uno basado en la programación de tareas para los equipos. Estas tareas incluyen inspecciones regulares, pruebas, reparaciones, entre otras, con el objetivo de reducir la frecuencia y el impacto de los fallos de un sistema [10]. De esta manera, se busca mantener los equipos en óptimas condiciones de funcionamiento y evitar paradas imprevistas.

A diferencia del mantenimiento correctivo, que se lleva a cabo una vez que el fallo ya ha ocurrido, el mantenimiento preventivo se planifica y se realiza de manera anticipada para prevenir posibles fallas.

Figura 2.3 Ley de Degradación Conocida.



Entre dos visitas puede aparecer un fallo que implique una intervención correctiva.

2.5 Comparación de los Diferentes Tipos de Mantenimiento

Existe un conjunto de aspectos que caracterizan a los diferentes tipos de mantenimiento, así como sus ventajas y desventajas que cada uno presenta, los cuales se deben tomar en cuenta antes de su aplicación. No debemos dejar de lado que estos tipos de mantenimiento están ligados uno del otro y pueden llegar a presentar similitudes.

Para poder realizar una comparación entre los tres tipos de mantenimiento mencionados anteriormente, tomaremos en cuenta los aspectos más representativos que nos lleven a comprender su características y diferencias entre cada una de ellas (Ver la tabla 2.1).

Tabla 2.1 Comparación tipos de Mantenimiento.

TIPOS DE MANTENIMIENTO			
	CORRECTIVO	PREVENTIVO	PREDICTIVO
DEFINICIÓN	Tipo de mantenimiento basado en la intervención (reparación o sustitución) del equipo una vez este haya fallado.	Mantenimiento que programa o planifica las acciones necesarias (inspección sustitución o reparación) de un equipo periódicamente de acuerdo a un plan de mantenimiento, independiente de su comportamiento, condición o estado.	Mantenimiento basado en la condición del equipo, que toma acciones en el mismo, cuando este empieza a presentar alguna anomalía. Se fundamenta en técnicas de diagnóstico que ayudan a monitorear los componentes de equipos.
APLICACIÓN	Normalmente aplicado a equipos que no son principales y que su inactividad no afecte en el proceso de producción.	Aplica para todo tipo de equipos que sean críticos o muy críticos en una industria.	Aplica para todo equipo crítico, o muy crítico, o aquellos que pueden llegar a provocar un riesgo en la producción.
PERIODICIDAD	En un correctivo normal, se espera a que la maquina llegue a presentar una falla para su posterior reparación. También existe la posibilidad de programar un mantenimiento correctivo.	Acciones periódicas o después de un periodo dado de funcionamiento, tomando en cuenta las especificaciones e instrucciones técnicas.	Monitoreo continuo de la condición de funcionamiento de los equipos.

TIPOS DE MANTENIMIENTO			
	CORRECTIVO	PREVENTIVO	PREDICTIVO
VENTAJAS	<ul style="list-style-type: none"> - Evita las paradas injustificadas - Minimiza las acciones de mantenimiento preventivo. 	<ul style="list-style-type: none"> - Reducción de paradas imprevistas de los equipos. - Prolonga la vida útil de los activos. - Permite mayor seguridad tanto en la parte de operación con los equipos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Se puede medir y detectar continuamente los parámetros del comportamiento de los equipos por medio de instrumentos de medición. - Se puede determinar una orden de mantenimiento antes de un evento de falla entre un ciclo del mantenimiento preventivo. - Mínimo impacto en la producción. - Reduce el tiempo de parada y pérdida de producción. - Incrementa la confiabilidad y disponibilidad.
DESVENTAJAS	<ul style="list-style-type: none"> - Puede afectar a la producción. - Alta probabilidad de tiempo de inactividad por reparación. 	<ul style="list-style-type: none"> - Puede llegar a ser un mantenimiento redundante si no se cuenta con una buena programación. - Modificación en los ciclos de trabajos de mantenimiento programados no son flexibles a las exigencias operacionales. 	<ul style="list-style-type: none"> - Mayor inversión en la implementación de equipos de monitoreo e instrumentos de medición de parámetros de funcionamiento. - Requerimiento de personal altamente calificado para el uso de los equipos y dispositivos utilizados para el monitoreo de los equipos, y con la capacidad de interpretar los resultados obtenidos de cada análisis realizado.

Fuente. Elaboración Propia.

2.6 Complemento el Mantenimiento Predictivo: El enfoque Proactivo de mantenimiento.

Utilizamos el término “Proactivo” para describir un enfoque en el que una persona u organización toma la iniciativa de actuar de manera anticipada y preventiva en lugar de esperar de que ocurra algo para responder.

En el contexto de mantenimiento, *ser proactivo* implica tener la capacidad de anticiparnos a posibles problemas o fallas. En lugar de esperar a que ocurra una falla o avería, el enfoque proactivo busca identificar y abordar la causa raíz de los problemas antes de que se produzcan. Esto implica realizar acciones como la monitorización continua de parámetros claves, el análisis de los datos en tiempo real, la planificación de mantenimientos, y la implementación de mejoras.

2.7 Técnicas organizativas de Gestión de Mantenimiento

Debemos comprender que las técnicas de mantenimiento son aquellas que nos ayudan a incorporar y replantear nuestro modelo de mantenimiento tradicional con un modelo organizativo que integra herramientas como el mantenimiento predictivo que es una metodología tecnológica por sus característica innovadora y tecnológica [3].

El RCM y el TPM son conocidas como técnicas organizativas de mantenimiento[3], las cuales aremos referencia tomando en cuenta que estas no son las únicas que existen, pero si son las más utilizadas en el ámbito industrial; que se pueden adaptar a la necesidad de cada industria o empresa.

2.7.1 TPM (Total Productive Maintenance)

El Mantenimiento Productivo Total o conocido como TPM (Total Productive Maintenance) por sus siglas en inglés, es una técnica organizativa, que se basa en transferir parte o todas las actividades de mantenimiento a los propios operarios de producción [3], implicando a la totalidad del personal en las tareas de mantenimiento preventivo con el objetivo de incrementar la confiabilidad de los equipos.

La implementación del TPM se traduce a tareas de mantenimiento básicas y corrección de pequeños problemas de los cuales se hacen cargo los operarios de los equipos [2]. Entre algunas tareas que se podrían delegan al personal de producción están: limpieza, lubricación, reapriete de tornillos, resolución de pequeñas averías, y comprobación, lectura y registro de parámetros.

2.7.1.1 Antecedentes Históricos y Objetivos del TPM.

El termino TPM fue definido por el Instituto Japonés de Ingenieros de Planta en el año 1971, desarrollándose en la industria automovilística, e implementándose en empresas como Toyota Mazda y Nissan [3].

Entre los objetivos del Mantenimiento Productivo Total están:

- **Reducción del número de averías del equipo**, con la intervención de personal de producción en averías o tareas de mantenimiento.

- **Reducción del tiempo de espera y preparación de los equipos de trabajo**, con el apoyo de personal de producción en la solución a pequeños fallos o la realización de revisiones o inspecciones.
- **Conservación del medio ambiente y ahorro de energía**, con la reducción de tiempos muertos de inactividad, y que el equipo trabaje en vacío.
- **Mayor formación y experiencia de los recursos humanos**, reduce considerablemente los niveles de error, accidentabilidad, etc.

El objetivo del TPM debe ser el de maximizar la eficiencia de los equipos junto al máximo rendimiento de los operarios [11] con la implementación de un mantenimiento autónomo, un mantenimiento de calidad, formación y entrenamiento de personal.

2.7.1.2 Las “Cinco S” y el TPM.

El Mantenimiento Productivo Total o también conocido como mantenimiento autónomo, se basa en la metodología de las “Cinco S”, terminología japonesa aplicada en el mantenimiento.

Tabla 2.2 Las 5s del TPM

Seiri (Clasificación).	Descarte, es decir, eliminar todo lo que no es útil.
Seiton (Orden).	Es decir, es la práctica de organizar, poner los medios materiales para que estén siempre disponibles cuando se necesite y sean fáciles de encontrar.
Seiso (Limpieza e inspección).	Es decir, mantener un ambiente de trabajo limpio, con la finalidad de llevar a cabo las inspecciones, descubrir anomalías, así detectar averías, mejorando la seguridad, la calidad y la eficiencia.
Seiketsu (Estandarización o normalización).	Es la práctica de desarrollar normas y procedimientos estandarizados; etiquetas, colores, delimitación de zonas, etc., utilizados para facilitar las operaciones.
Shitsuke (Cumplimiento o disciplina).	Es decir, tener estos valores sin la necesidad de supervisión para cumplir con las rutinas de orden, inspección, mantener el orden y limpieza para cumplir los estándares de auto mantenimiento perseguidos por el TPM.

Fuente. Elaboración Propia.

2.7.2 RCM (Reliability Centered Maintenance)

El Mantenimiento Centrado en Confiabilidad o RCM (*Reliability Centered Maintenance*) por sus siglas en inglés, es una metodología de mantenimiento basado en el análisis de confiabilidad de los activos físicos. Se basa en principios fundamentales, como la identificación de funciones críticas de los equipos y el análisis de los modos de fallas, causas y consecuencias asociadas [3].

El RCM está enfocado en la optimización de los programas de mantenimiento preventivo y predictivo, para incrementar la eficiencia de los equipos (tiempo de actividad, rendimiento, calidad) y tratando de minimizar los costos relacionados con mantenimiento, buscando las estrategias más adecuadas de mantenimiento para los equipos críticos.

2.7.2.1 Antecedentes Históricos y Objetivos del RCM.

Esta técnica de mantenimiento fue desarrollada por la industria aeronáutica norteamericana en la década de 1960, con la finalidad de ayudar a las personas a determinar las políticas para mejorar las funciones de los activos físicos y manejar las consecuencias de sus fallas. Comenzó a utilizarse por la industria militar en la década de los 1970. [12]. A mediados de la década de los 70, a solicitud del gobierno de los Estados Unidos de América que solicita un reporte a la industria aérea para comprender de mejor manera esta filosofía de mantenimiento, se llega a elaborar el reporte llamado “RELIABILITY CENTERED MAINTENANCE” que fue publicado en 1978, siendo aun uno de los más importantes en la historia de los manejos de los activos físicos[13]. Empezando a aplicarse también en el campo nuclear por el EPRI (Electric Power Research Institute) en 1982, y con el paso de los años esta técnica de mantenimiento se extiende a otros sectores como la industria minera y de manufactura.

La evolución del RCM con la incorporación de temas ambientales al proceso de toma de decisiones, el desarrollo de reglas más precisas e intervalos para las labores de mantenimiento, incorporación de criterios de riesgo cuantitativo para la búsqueda de fallas, es conocida en la actualidad como RCM 2 [13], cuyo objetivo es identificar una política adecuada del manejo de las fallas, tratando cada falla en función a sus consecuencias y características técnicas.

Entre los objetivos más relevantes del RCM tenemos:

- **Incrementar la confiabilidad de los activos o componentes**, es decir, que estos realicen la función que le fue establecida bajo las condiciones dadas y el intervalo de tiempo dado, con un buen desempeño durante toda su vida útil. La confiabilidad es garantía de calidad en el tiempo.
- **Aumentar la fiabilidad de la instalación**, es decir, disminuir el tiempo de parada de la planta por averías imprevistas que impidan cumplir con los planes de producción.
- **Aumentar la disponibilidad** con la detección temprana de problemas.
- **Incrementar la seguridad** operacional y la protección ambiental.
- **Reducir los costos asociados al mantenimiento**

2.7.2.2 Norma SAE JA1011 y el RCM

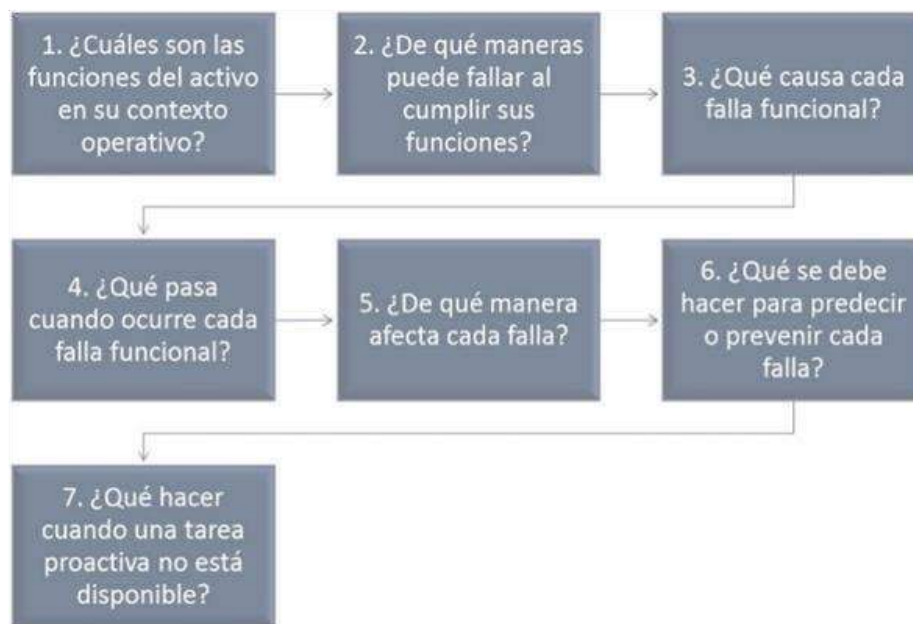
Con el pasar de los años, se llegó a desarrollar diferentes versiones del proceso RCM por diferentes organizaciones muchas de ellas con poco o ningún parecido al original que fue desarrollado por “Nowlan y Heap”⁵[14]. Debido a la publicación de múltiples artículos y documentos acerca del RCM en los cuales muchos de ellos describían procesos muy diferentes a los que se daba el mismo nombre, RCM, se da la necesidad de definir la frase “proceso RCM”. En 1996 se empezó a desarrollar un modelo a fin con el RCM, el cual al ser concluido fue presentado como “Criterios de Evaluación para Procesos de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM)”, aprobada por la SAE⁶.

La norma SAE JA1011 “Criterios de Evaluación para Procesos de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM)” aprobada por la Junta de Normas Técnicas de la SAE y el Consejo Aeroespacial de la SAE en septiembre de 1999, tiene el objetivo de ayudar a aquellos que pretendan aplicar el RCM estableciendo los criterios mínimos que debe cumplir una metodología para que pueda definirse como RCM; especifica que cualquier proceso de RCM debe asegurarse de responder satisfactoriamente en secuencia las preguntas que se plantea (ver Fig. 2.5).

⁵ Nowlan y Heap, autores del reporte llamado “RELIABILITY CENTER MAINTENANCE”, publicado en 1978.

⁶ SAE, Society of Automotive Engineers.

Figura 2.5 Proceso de mantenimiento centrado en confiabilidad.



Fuente: Omar López; Tolentino, Metodología de mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) considerando taxonomía de equipos, bases de datos y criticidad de efectos. Pág.52.

2.7.3 El Análisis de Criticidad y las técnicas organizativas del mantenimiento

El análisis de criticidad está estrechamente relacionado con las técnicas organizativas de Mantenimiento como el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) y Mantenimiento Productivo Total (TPM). Ambas técnicas se utilizan para optimizar la gestión y el mantenimiento de los activos, incluyendo la identificación de equipos críticos y la definición de estrategias de mantenimiento.

Tanto el RCM como el TPM se complementan con el Análisis de Criticidad, ya que este último proporciona una base sólida para determinar qué equipos son críticos y cómo se deben priorizar las estrategias de mantenimiento. El análisis de criticidad, en conjunto con el RCM y el TPM, ayuda a establecer un enfoque integral y eficiente para la gestión de activos, asegurando un mantenimiento óptimo de los equipos más importantes para la operación y la producción de la empresa.

2.7.4 El TPM y el RCM como bases estratégicas del Mantenimiento Predictivo

Si bien la implementación de técnicas organizativas como ser el RCM o el TPM no son un requisito previo para realizar un mantenimiento Predictivo, su consideración tiene un impacto significativo en la efectividad y los resultados del mantenimiento. Estas técnicas, que cuentan con enfoques estructurados y metodológicos, nos brindan una base sólida para la gestión⁷ eficiente de mantenimiento.

2.8 Motores Eléctricos

Un motor eléctrico es una maquina eléctrica rotatoria que cumple la función de transformar la energía eléctrica suministrada por la red en energía mecánica, haciendo uso de los campos electromagnéticos.

2.8.1 Tipos de motores eléctricos

Existen principalmente dos tipos de motores eléctricos, dependiendo al tipo de energía que se les suministra estas pueden ser: motores de corriente continua (DC) o motores de corriente alterna (AC). En la industria, los motores más utilizados son los de inducción trifásicos de jaula de ardilla. El uso de los motores síncronos y los motores de CC para accionamientos pesados y de precisión, etc., también son comunes. Con la introducción de variadores de frecuencia para el control de velocidad y par, los motores trifásicos, los motores de inducción se están volviendo cada vez más aceptables para aplicaciones en las que los accionamientos de CC eran anteriores usado [15].

Los motores de corriente continua, así como los síncronos de corriente alterna tienen una utilización y unas aplicaciones muy específicas.

⁷ La gestión hace referencia a la planificación, organización, coordinación y control de los recursos y actividades de una organización para lograr sus objetivos. En el contexto de mantenimiento, la gestión implica administrar de manera efectiva y eficiente los procesos recursos y estrategias relacionados con el mantenimiento de activos.

Los motores de CA asíncronos, tanto monofásicos como trifásicos, son los que tienen una aplicación más generalizada gracias a su facilidad de utilización, poco mantenimiento y bajo costo de fabricación.

Por esta razón tanto en esta capítulo como en los siguientes nos centraremos en los motores eléctricos de CA de inducción, como parte fundamental de estudio en el desarrollo de este proyecto.

Figura 2.6 Tipos de Motores Eléctricos.



Fuente: Elaboración propia.

2.8.1.1 Motores eléctricos de corriente alterna

Son los más utilizados porque la distribución de energía eléctrica normalmente está en corriente alterna. Los principales tipos son:

2.8.1.1.1 Motor síncrono

Funciona con velocidad fija, es decir su velocidad esta sincronizada con la frecuencia de la red a la que está conectada la máquina [16]. Utilizada solamente para grandes potencias (debido a su alto costo en tamaños menores), o cuando se necesita de velocidad invariable.

2.8.1.1.2 Motor de Inducción o asíncrono

Funciona normalmente con una velocidad constante, que varía ligeramente con la carga mecánica aplicada al eje [16]. Son motores en el que la rotación del eje es menor que la frecuencia del campo de sincronismo.

Es el motor más utilizado debido a su gran simplicidad, robustez, y bajo costo, siendo adecuado para casi todos los tipos de máquinas que se encuentran en la práctica [16].

2.8.2 Principio de funcionamiento del motor eléctrico de CA

El funcionamiento de un motor eléctrico de CA se basa en la creación de un campo magnético giratorio originado en un devanado inductor que está situado en el estator, que al ser alimentado por una corriente alterna suministrada por la red, genera su propio campo magnético, que a su vez induce uno en los cables del rotor, y los dos campos interactúan para permitir que el rotor sea empujado y convierta efectivamente la energía eléctrica en energía mecánica [17].

2.8.3 Partes constructivas de motor de CA

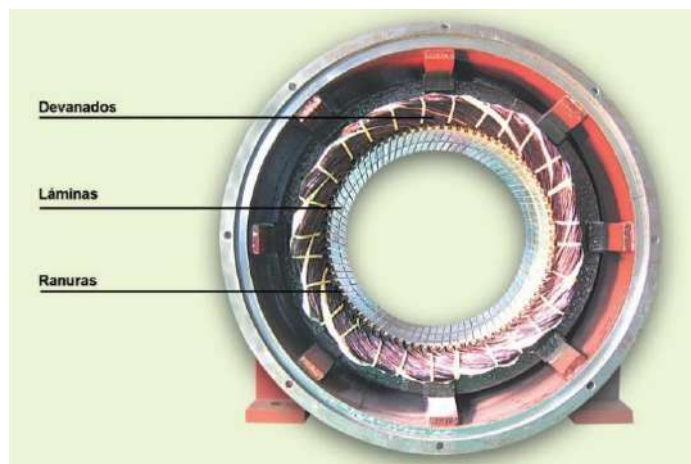
Poniendo como base a el motor asíncrono trifásico o también conocido como motor de inducción, se desarrolla una breve descripción de las principales partes que componen a un motor eléctrico.

2.8.3.1 Estator

Definimos al estator como la parte estacionaria o fija del motor, que se compone de un conjunto de devanados o bobinas de alambre aislado que está dispuesto alrededor de un núcleo magnético. Los devanados del rotor son los que están conectados con la fuente de alimentación trifásica de corriente alterna.

De la estructura del estator depende todo lo relacionado con los flujos magnéticos variables en el tiempo que provocan pérdidas por histéresis (ligadas a la magnetización no lineal del material) y por corrientes parásitas inducidas [18].

Figura 2.7 Partes del estator



Fuente. ABB, "Cuaderno de aplicaciones técnicas 6. El motor asíncrono trifásico"

Tabla 2.3 Partes del Estator

Parte del Estator	Descripción
Núcleo magnético	El núcleo magnético del estator está compuesto por láminas o chapas de material ferromagnético (aleación de acero al silicio o acero macizo aisladas entre sí) laminado. Estas láminas están apiladas y unidas para formar un camino cerrado que guía y concentra el flujo magnético generado por las bobinas del estator.
Bobinas o devanados	El estator contiene bobinas o devanados de alambre conductor, generalmente de cobre. Estos devanados están enrollados alrededor de las ranuras del estator y están conectados en configuración trifásica (R, S, T) para generar un campo magnético giratorio cuando se alimenta con corriente alterna trifásica.
Ranuras	Las ranuras son aberturas o espacios en el estator donde se alojan las bobinas o devanados. Las ranuras están diseñadas para asegurar que las bobinas se mantengan en su lugar y minimizar la dispersión del flujo magnético.

Fuente. Elaboración propia

2.8.3.2 Rotor

Es la parte móvil del motor eléctrico ubicado dentro del estator. Está constituido por una serie de barras o de arrollamientos dispuestos en forma cilíndrica. Es el encargado de transmitir la potencia mecánica desarrollada por el motor mediante el eje que lo conforma, el cual es tratado térmicamente para evitar problemas de fatiga y deformación [16].

En los motores de inducción trifásicos el rotor puede ser de dos tipos principales: de tipo jaula de ardilla o de rotor devanado (ver Figura 2.8).

- **Rotor de jaula de ardilla.** Los rotores de tipo jaula de ardilla consiste en barras conductoras generalmente de cobre o aluminio cortocircuitadas en ambos extremos. Su geometría, disposición y material pueden variar según las características de cupla y de corriente de arranque que se desea.
- **Rotor devanado.** A diferencia de los rotores jaula de ardilla, un rotor devanado o también conocido como rotor bobinado está constituido por bobinas en lugar de barras. Los devanados se conducen hacia el exterior mediante anillos rozantes para ser cortocircuitados ya sea de forma directa o mediante resistencias adicionales.

Figura 2.8 Tipos de rotor en motores de inducción

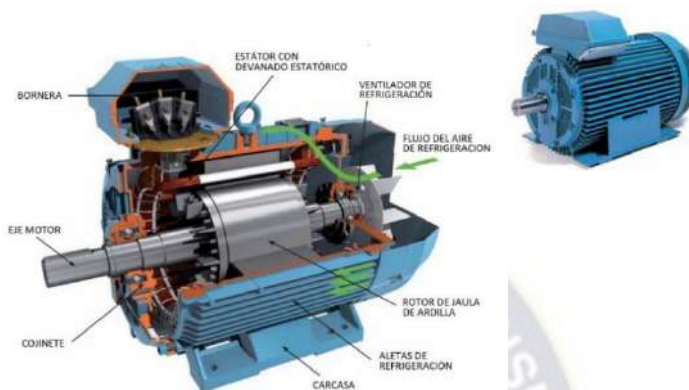


Fuente <https://oswos.com/es/motor-asincrono/>

Al igual que el circuito magnético del estator, está conformado por un conjunto de chapas delgadas aisladas entre sí, y apiladas de tal manera que forman un cilindro sobre el eje del rotor.

Otras partes del motor a inducción, pero no menos importantes son: el ventilador, protección del ventilador, tapas, caja de conexiones, placa de bornes, rodamientos o cojinetes.

Figura 2.9 Vista en conjunto y seccionada de un motor asíncrono.

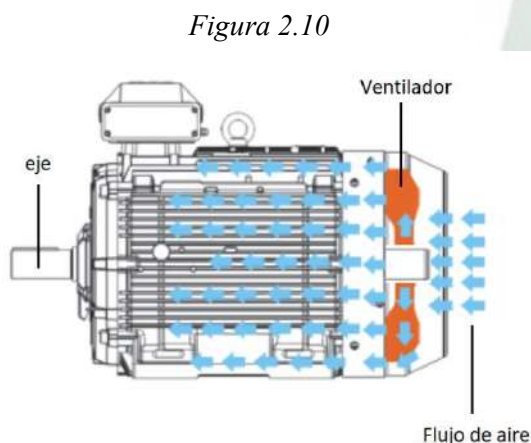


Fuente: ABB, cuaderno de aplicaciones técnicas n°6 – El motor asíncrono trifásico. Pág.5

2.8.3.3 Ventilador

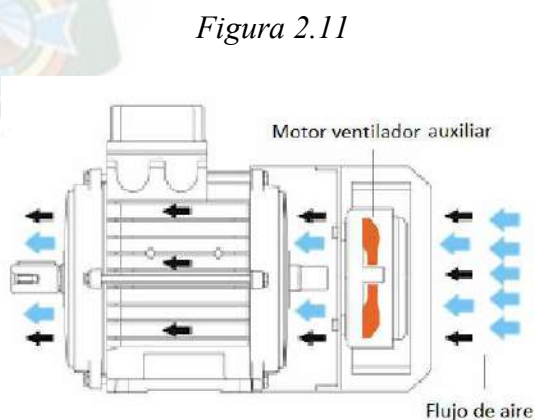
Es el encargado de refrigerar el motor tanto interna como externamente (ver figura 2.10). Este está acoplado directamente en el eje del motor (solidario al rotor), por lo cual su sentido y velocidad de giro depende del mismo. Normalmente es de un material ligero para producir una menor resistencia y el menor ruido posible. Existen motores que según su tipo de aplicación requieren una refrigeración auxiliar por lo cual utilizan un motor ventilador acoplados al mismo (ver figura 2.11).

Figura 2.10 Refrigeración de motor eléctrico por flujo aire – ventilador acoplado al motor.[17]



Fuente: Elaboración propia

Figura 2.11 Refrigeración de motor eléctrico por flujo de aire – ventilador auxiliar (refrigeración forzada) [17].



Fuente: Elaboración propia

2.8.3.4 Carcasa

La carcasa en un motor eléctrico es la parte que protege y cubre al estator y al rotor. En este se sujeta la base que soporta toda fuerza mecánica que el motor sufre en operación, siendo el punto de sujeción o anclaje de motor en una superficie rígida. La carcasa coadyuva en la refrigeración del mismo y puede estar fabricada de diferentes materiales, de acuerdo a su diseño y aplicación. Así podemos tener carcasas totalmente cerradas, abiertas, a prueba de goteo, a prueba de explosiones, de tipo sumergible.

2.8.3.5 Borneras

La placa de bornes (ver figura 2.12-a), se encuentra ubicado típicamente dentro de la caja de bornes (ver figura 2.12-b). Esta caja puede ser de diferentes tamaños y generalmente se ubica en la parte superior o lateral del motor eléctrico ya sea este monofásico o trifásico. Su función principal es facilitar las conexiones del motor hacia una fuente de alimentación o dispositivo de control y protección, como variadores de frecuencia, o arrancadores suaves (Soft Starter), antes de ser alimentados por la red eléctrica para la cual fue diseñado.

Las placas de bornes, está compuesto por una base de material aislante (normalmente resina o bakelita) y unos bornes de latón conductivo. Es en estos bornes donde se realizarán las conexiones eléctricas del motor, ya sea en configuración triángulo o estrella dependiendo de las especificaciones técnicas del motor, asegurando el buen funcionamiento y evitando posibles fallas.

Figura 2.12 Caja de bornes y bornera de motor eléctrico.



Fuente: ABB, Motores de baja tensión – la guía del motor ABB.

2.8.3.6 Rodamientos en motores eléctricos

El objetivo de usar rodamientos en máquinas eléctricas es sujetar y fijar el rotor, mantener una holgura⁸ pequeña y constante, y transferir las cargas del eje al bastidor⁹ del motor [19]. El rodamiento contribuye con el óptimo funcionamiento de las partes giratorias del motor, reduciendo la fricción y logrando que se consuma menos potencia.

Figura 2.13 Rodamientos para motores Eléctricos.



Fuente: NSK, Rodamientos para motores industriales.

2.8.3.6.1 Tipos de rodamientos utilizados en motores eléctricos

Entre los rodamientos más utilizados en un motor eléctrico tenemos los rodamientos a bolas y los de rodillos.

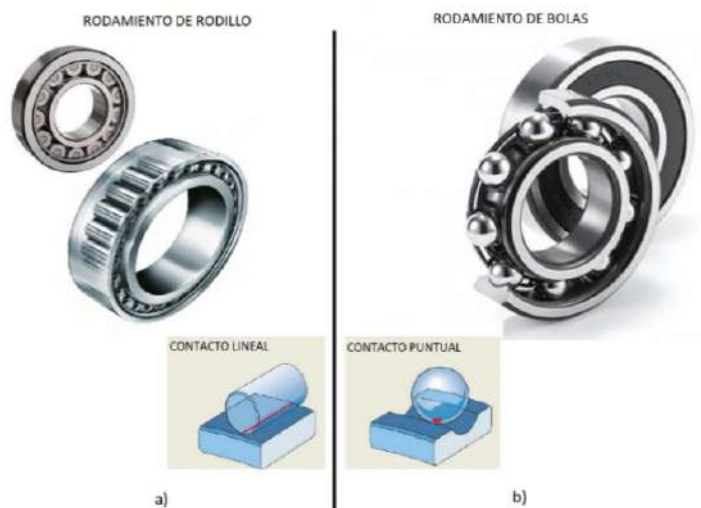
A. Rodamientos tipo bolas. Son rodamiento que tiene la característica de permitir velocidades de rotación elevadas gracias a que el contacto bola – pista es en teoría de forma puntual, aunque esto también limita su capacidad de carga. (ver figura 2.14-b).

⁸ Espacio vacío que queda entre dos cosas que están encajadas una dentro de la otra (estator y rotor).

⁹ Armazón que sostiene al motor.

B. Rodamientos de rodillos. Son rodamientos que se caracterizan por soportar cargas radiales mayores que los rodamientos de bolas, esto gracias a que el contacto rodillos – pista es teóricamente lineal, pero soporta velocidades menores que un rodamiento de bolas del mismo tamaño. (ver figura 2.14-a).

Figura 2.14 tipos de rodamientos.

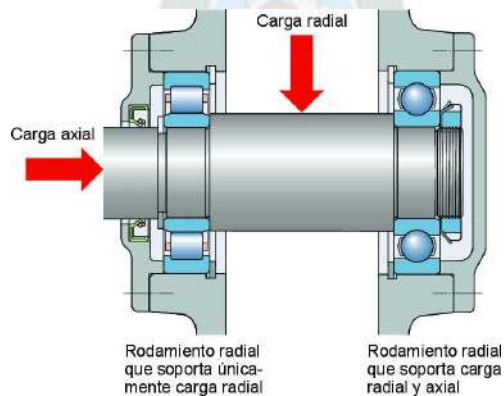


Fuente: SKF, Rodamientos.

2.8.3.6.1.1 Rodamientos de carga axial y radial

La carga axial es la fuerza que se produce paralela al eje, mientras que la carga radial es la fuerza que se produce perpendicular al eje del motor (ver figura 2.15).

Figura 2.15 Carga radial y axial en rodamientos.

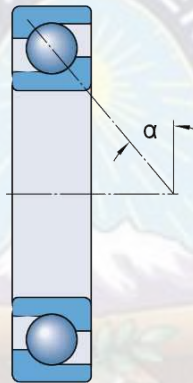


Fuente: SKF, Rodamientos.

El motor durante su funcionamiento soporta estas cargas a través de su eje, el cual tiene como soporte a los rodamientos. Los rodamientos llegan a soportar la carga ya sea axial o radial o una combinación de ambas, según su diseño y aplicación de fábrica.

En la gran variedad de rodamientos, existe tanto rodamientos de bolas y rodillos con diseños para resistir cargas axiales como radiales. El ángulo de contacto (ver figura 2.16) determina el grupo al que pertenece el rodamiento. Los rodamientos con un ángulo de contacto $\leq 45^\circ$ son rodamientos radiales, los demás son rodamientos axiales [20].

Figura 2.16 Angulo de contacto en Rodamientos.



Fuente: Fuente: SKF, Rodamientos.

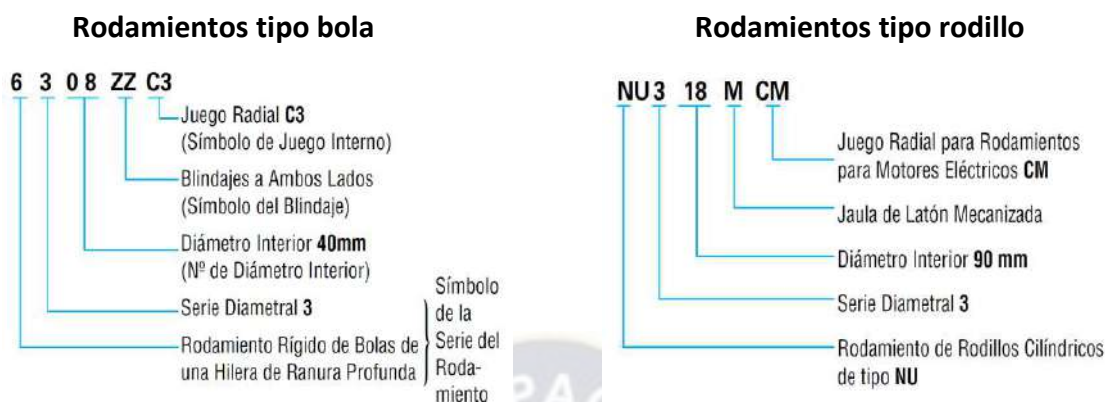
2.8.3.6.2 Especificaciones de los rodamientos

- **Codificación de Rodamientos**

Las denominaciones de los rodamientos están formadas por una combinación de números y letras. Con esta se identifican los siguientes parámetros:

- Tipo de rodamiento
- Dimensiones
- Precisión de funcionamiento y dimensional
- Juego del rodamiento
- Otras características

Figura 2.17 Nomenclatura de rodamientos.



Fuente: SKF, Rodamientos.

2.8.3.7 Placa característica

La placa característica es aquella parte que identifica y nos da a conocer toda la información correspondiente al motor Eléctrico, como ser: parámetros eléctricos, mecánicos y de funcionamiento del motor, cuyas características cumplen normas como la IEC 60034-30:2008 [21].

Figura 2.18 Placa característica de motores eléctricos

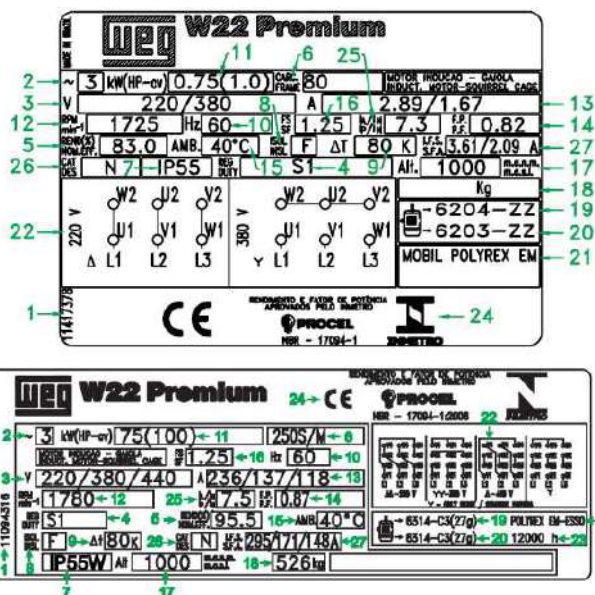


Fuente: Elaboración propia

Esta placa se encuentra ubicada en la parte superior o lateral de la carcasa del motor y está fabricada de materiales como aluminio o acero donde los datos se encuentran grabados (ver figura 2.18).

2.8.3.7.1 Datos de Placa de un motor eléctrico trifásico.

Figura 2.19 Datos de placa característica de motores eléctrico



Fuente: WEG, Motor eléctrico modulo I. Pág. 12

Tabla 2.4 Datos de placa característica de motores eléctrico.

1 - Código del motor	15 - Temperatura ambiente máxima
2 - Numero de fases	16 - Factor de servicio
3 - Tensión nominal de operación	17 - Altitud
4 - Régimen de servicio	18 - Peso del motor
5 - Eficiencia	19 - Especificación del rodamiento delantero
6 - Tamaño de carcasa	20 - Especificación del rodamiento trasero
7 - Grado de protección	21 - Tipo de grasa de los rodamientos
8 - Clase de Aislamiento	22 - Diagrama de conexión para tensión nominal
9 - Temperatura de la Clase de Aislamiento	23 - Intervalo de lubricación en horas
10 - Frecuencia	24 - Certificaciones
11 - Potencia nominal del motor	25 - Corriente de arranque / Corriente nominal del motor
12 - Velocidad nominal del motor en RPM	26 - Categoría de par
13 - Corriente nominal de operación	27 - Corriente de factor de servicio
14 - Factor de potencia	

Fuente: WEG, Motor eléctrico modulo I. Pág. 12.

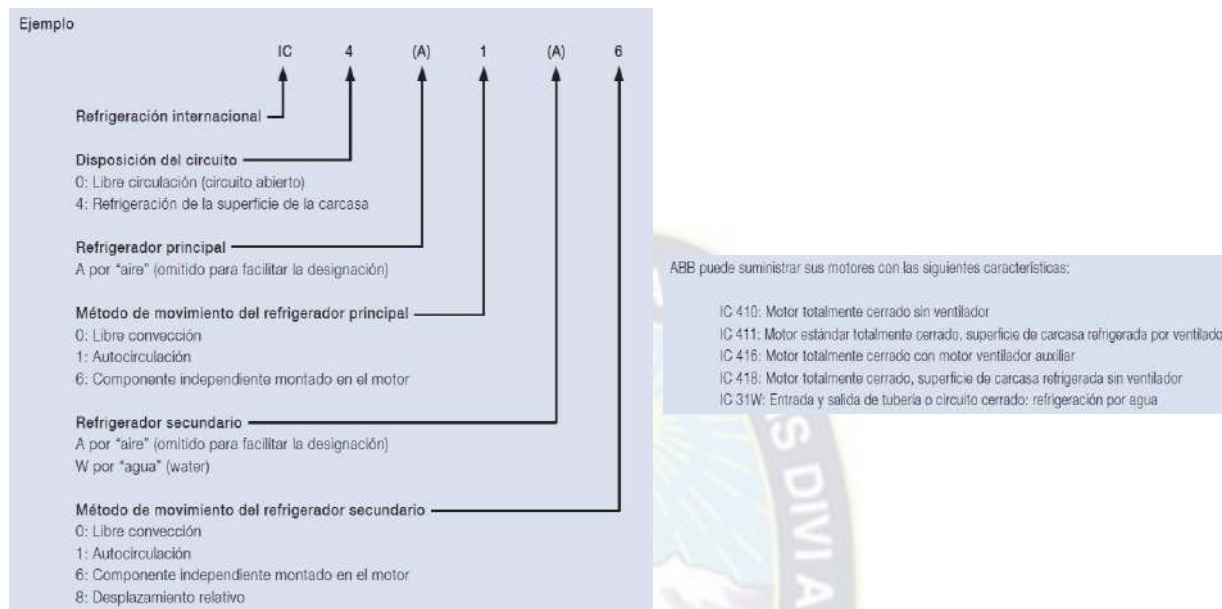
2.8.4 Características (variables) técnicas de motores eléctricos

2.8.4.1 Métodos de refrigeración de un motor eléctrico

La norma IEC 60034-6 (Máquinas eléctricas rotativas. Parte 6: Métodos de refrigeración (Código IC), normaliza los sistemas de refrigeración, codificándolos con las letras “IC” seguido de

números según su tipo de refrigeración (Ver figura 2.20). A su vez se tiene una clasificación por su tipo de refrigeración que pueden ser: refrigeración por aire directa e indirecta.

Figura 2.20 Codificación según su tipo de refrigeración en motor eléctrico.



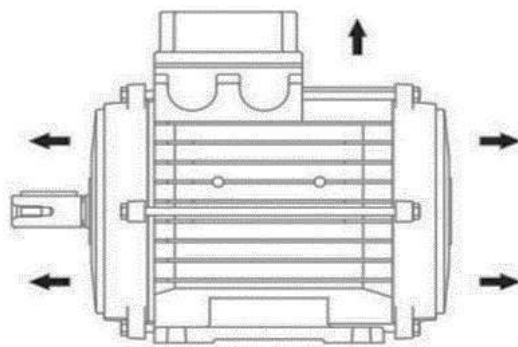
Fuente: ABB, La guía del motor, motores de baja tensión. Pag.29

2.8.4.1.1 Refrigeración por aire directa

Entre los motores más utilizados se tiene:

IC410 – No utiliza ningún tipo de ventilador para forzar la extracción de calor. Tiene la ventaja de tener un menor tamaño por la ausencia de ventilado. (Figura 2.21).

Figura 2.21 Motor sin ventilador.

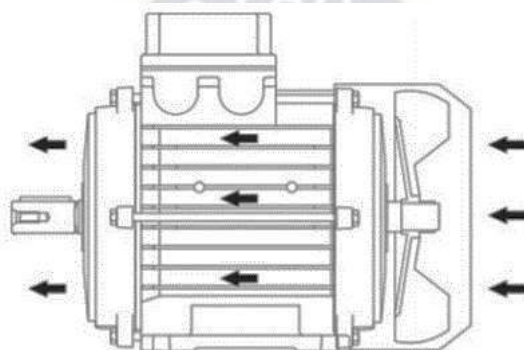


Fuente: ABB, La guía del motor, motores de baja tensión. Pag.29

IC411 – Dispone de un ventilador fijado al mismo eje del motor. La carcasa presenta aletas que disipan el calor y por donde el ventilador impulsa el aire a través de los canales formados por las aletas. Este sistema es utilizado en la mayor parte de los motores instalados.

Uno de los inconvenientes de este tipo de refrigeración es que, con el uso de un variador de frecuencia para su accionamiento del motor, si este trabaja por debajo de su velocidad nominal, el caudal de aire que se genere puede llegar a ser insuficiente. Esto debe tomarse en cuenta en la aplicación que se da al motor, sobre todo en la fase de diseño. (Figura 2.22).

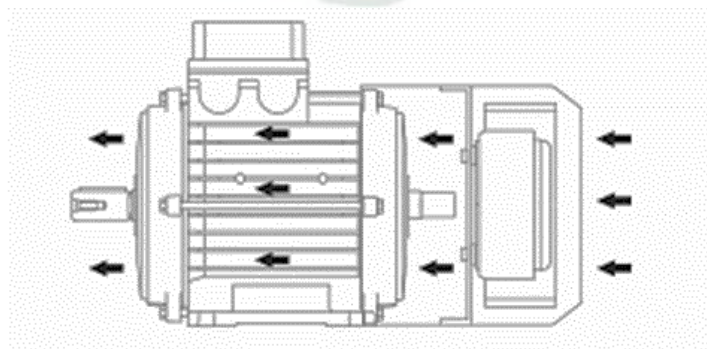
Figura 2.22 Refrigeración de motor por ventilador solidario al eje.



Fuente: ABB, La guía del motor, motores de baja tensión. Pag.29

IC416 – En este tipo de refrigeración se cuenta con un ventilador accionado por un motor propio y con alimentación independiente. Este es una opción cuando el motor trabajara a velocidades menores a la nominal y por gran periodo de tiempo. Un aspecto importante a tomar en cuenta en este tipo de refrigeración, es que se debe cuidar el buen funcionamiento de la misma ya que si no llegara a funcionar pone en riesgo el motor principal. (Figura 2.23).

Figura 2.23 Refrigeración de motor por ventilador auxiliar.



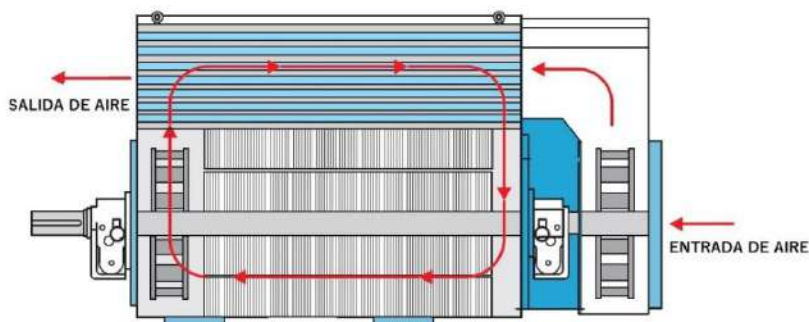
Fuente: ABB, La guía del motor, motores de baja tensión. Pag.29

2.8.4.1.2 Refrigeración por aire indirecta.

Utilizado en motores eléctricos de alta potencia, este tipo de refrigeración basa su funcionamiento en el intercambio de calor por convección, el cual es forzado por un ventilador, utilizando un intercambiador aire – aire. Los tres tipos de refrigeración utilizan un intercambiador aire-aire. De esta forma el aire del interior del equipo no está en contacto con el exterior.

IC611 - Motor refrigerado con ventilador acoplado al eje del motor interno que recircula el aire por el interior y un segundo ventilador el cual fuerza el aire hacia el exterior.

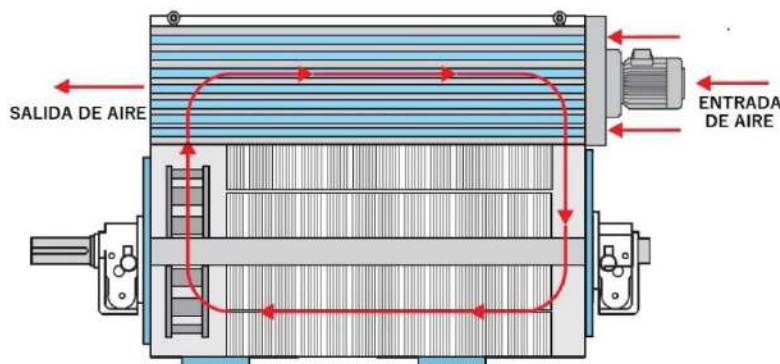
Figura. 2.24 Refrigeración de motores eléctricos por aire indirecta (IC611).



Fuente. Welkom, Electric motor cooling system.

IC616 - Motor refrigerado por un ventilador solidario al eje y un ventilador auxiliares los cuales realizan el intercambio de calor hacia el exterior del motor.

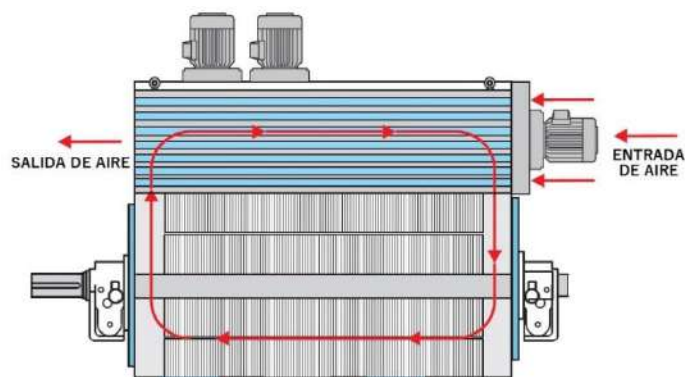
Figura. 2.25 Refrigeración de motores eléctricos por aire indirecta (IC616).



Fuente. Welkom, Electric motor cooling system.

IC666 – Motor refrigerado por un sistema de ventilación forzada realizando el intercambio térmico con el exterior, cuales están ubicados encima del estator.

Figura. 2.26 Refrigeración de motores eléctricos por aire indirecta (IC666).

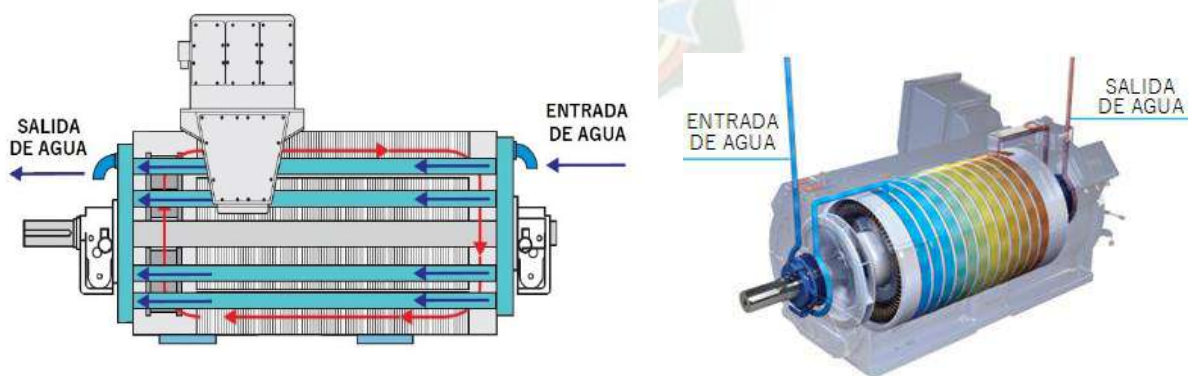


Fuente. Welkom, Electric motor cooling system.

2.8.4.1.3 Refrigeración por agua y aire.

Motores refrigerados con agua, que, con la ayuda de un ventilador acoplado al eje o ventiladores externos, que recircula el aire en el interior del motor, mientras que el agua (liquido refrigerante) que circula por el interior a través de un serpentín realiza el intercambio térmico. Entre las cuales se tiene: **IC31W, IC81W, IC86W**.

Figura. 2.27 Refrigeración de motores eléctricos por aire – agua (IC31W).



Fuente. Welkom, Electric motor cooling system.

2.8.4.2 Régimen de servicio

Según la IEC 60034-1¹⁰, el régimen de servicio es el grado de regularidad de la carga a la que el motor es sometido. Los motores normales son proyectados para régimen continuo S1, donde la carga es constante, por tiempo indefinido, e igual a la potencia nominal del motor.

Tabla 2.5 Régimen de servicio de motores eléctricos

RÉGIMEN DE SERVICIO	CARACTERÍSTICAS
S1	Servicio continuo Funcionamiento continuo con carga constante, el motor alcanza el equilibrio térmico de funcionamiento.
S2	Servicio temporal Funcionamiento a carga constante durante un periodo de tiempo menor al necesario para alcanzar el equilibrio térmico. Posterior a su funcionamiento la maquina llega a un estado inicial (temperatura del motor igual temperatura ambiente)
S3	Servicio intermitente periódico
S4	Servicio intermitente periódico con arranque
S5	Servicio interrumpido con carga intermitente
S6	Servicio interrumpido periódico con carga intermitente
S7	Servicio interrumpido periódico con frenado eléctrico
S8	servicio interrumpido periódico con cambios de carga y velocidad relacionados
S9	servicio con variación no periódica de la carga y de la velocidad
S10	servicio con cargas individuales constantes

Fuente: ABB, Nota técnica IEC 60034-30-1, clases de eficiencia del motor.

2.8.4.3 Eficiencia

Según el DLE.¹¹, eficiencia “es la capacidad de disponer de alguien o algo para conseguir el cumplimiento adecuado de una función”. En un motor eléctrico la eficiencia es una medida de la eficacia¹² con que un motor convierte la energía eléctrica de entrada en la energía mecánica de salida para impulsar una carga[15]; se define como la relación de la potencia mecánica entregada por el motor (energía útil), respecto la potencia eléctrica de entrada (energía absorbida), normalmente expresado en forma porcentual.

¹⁰ Norma IEC 60034-1 - Máquinas eléctricas rotativas - Parte 1: Valores nominales y características de funcionamiento.

¹¹ DLE, Diccionario de la Lengua Española.

¹² Eficacia, capacidad de lograr el efecto que se desea o se espera.

Ecuación 2.1
$$eff = \frac{P_U(\text{energía util})}{P_E(\text{energía absorbida})} * 100\%$$

Alto valores potencia generalmente corresponden a altos valores de eficiencia, Motores pequeños de potencia fraccionada tienden a tener baja eficiencia en operación, mientras que motores de potencias elevadas generalmente son muy eficientes.

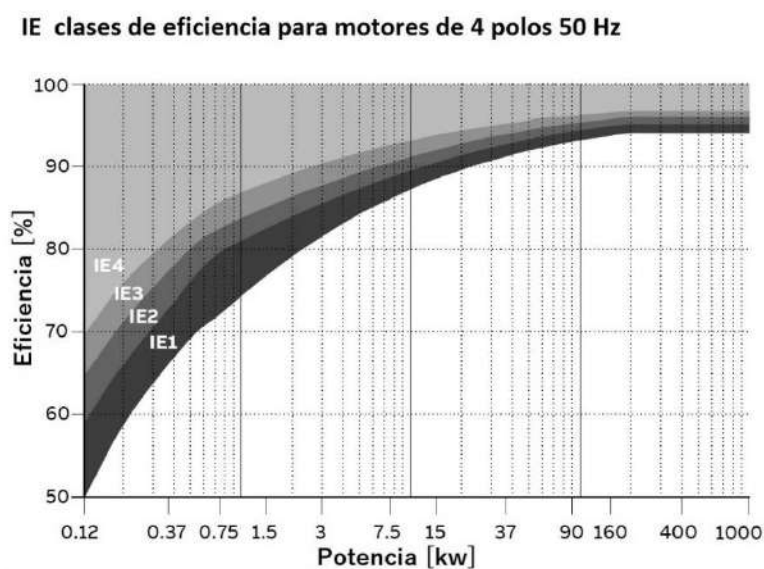
La eficiencia del motor se fija a un voltaje de operación y una carga de eje particulares por diseño, y no puede ser cambiado externamente.

2.8.4.3.1 Clases de eficiencia

El estándar IE (International Efficiency) define cuatro Clases de eficiencia para motores eléctricos de una sola velocidad que son clasificado de acuerdo con IEC 60034-1 o IEC 60079-0 (explosivo atmósferas) y diseñado para operar en voltaje sinusoidal.

Figura.2.28 Clases de eficiencia de motores eléctricos

Super-Premium efficiency	IE4
Premium efficiency	IE3
High efficiency	IE2
Standard efficiency	IE1



Fuente: ABB, Nota técnica IEC 60034-30-1, clases de eficiencia del motor.

2.8.4.4 Grado de protección

La norma IEC 60034-5 clasifica los grados de protección de las maquinas eléctricas mediante dos letras (**IP**) seguido de dos dígitos. El primer dígito indica protección contra la entrada de cuerpos extraños y contacto accidental, mientras el segundo dígito indica la protección contra la entrada de agua [22] (Ver figura 2.29).

Figura.2.29 Tipo de código en grado de protección IP.



Fuente: WEG, “Guía Práctica de capacitación técnico / comercial - Motor eléctrico modulo I.

Tabla 2.6 Grados de Protección IP (números característicos).

1º Dígito	
Dígito	Indicación
0	Sin protección
1	Protección contra la entrada de cuerpos extraños de dimensiones superiores a 50 mm
2	Protección contra la entrada de cuerpos extraños de dimensiones superiores a 12 mm
3	Protección contra la entrada de cuerpos extraños de dimensiones superiores a 2,5 mm
4	Protección contra la entrada de cuerpos extraños de dimensiones superiores a 1,0 mm
5	Protección contra la acumulación de polvos perjudiciales al motor
6	Totalmente protegido contra el polvo

2º Dígito	
Dígito	Indicación
0	Sin protección
1	Protección contra gotas de agua en la vertical
2	Protección contra gotas de agua hasta la inclinación de 15° en relación a vertical
3	Protección contra agua de lluvia hasta la inclinación de 60° en relación a vertical
4	Protección contra salpicaduras provenientes de todas direcciones
5	Protección contra chorros de agua provenientes de todas las direcciones
6	Protección contra olas de agua
7	Inmersión temporal
8	Inmersión permanente

Fuente: WEG, “Guía Práctica de capacitación técnico / comercial - Motor eléctrico modulo I.

Figura.2.30 Grados de Protección IP de motores abiertos y cerrados.



Fuente: WEG, “Guía Práctica de capacitación técnico / comercial - Motor eléctrico modulo I.

2.8.4.5 Clase de aislamiento

Conforme a el estándar IEC 60034-1, las Clases de Aislamiento utilizadas en maquina eléctricas y los respectivos límites de temperatura se clasifican en letras ligadas a una temperatura establecida. (Ver tabla 2.7).

Hay actualmente cinco clases de aislamiento para motores eléctricos en uso: A, E, B, F y H (aunque hay también las clases N, R y S). De estos cuatro las clases B, F y H son comúnmente usados. Estas clases especifican el aumento de temperatura permisible desde una temperatura ambiente de 40°C.

Tabla 2.7 Clase de Aislamiento.

Clase de Aislamiento	Temperatura
Clase A	105°C
Clase E	120°C
Clase B	130°C
Clase F	155°C
Clase H	180°C

Fuente. WEG, Motor eléctrico - Elaboración propia.

Figura.2.31 Composición de la temperatura en función de la clase de aislamiento.

Clase de aislamiento		A	E	B	F	H
Temperatura ambiente	°C	40	40	40	40	40
Δt = elevación de temperatura (método de la resistencia)	°C	60	75	80	105	125
Diferencia entre el punto más caliente y la temperatura media	°C	5	5	10	10	15
Total: temperatura del punto más caliente	°C	105	120	130	155	180

Fuente: WEG, Motor eléctrico – Guía de especificaciones. Pág. 35.

2.8.4.6 Factor de Servicio (FS)

El estándar NEMA MG 1 (1.42, Service Factor – AC MOTORS), define el factor de servicio como: “Un multiplicador que, cuando se aplica a la potencia nominal, indica una carga de potencia permisible que se puede transportar en las condiciones especificadas para el factor de servicio”.

El Factor de Servicio (FS) o Service Factor (SF), es una medida que especifica la capacidad de sobrecarga a la cual un motor puede operar sin sufrir daños. El estándar NEMA¹³ estandariza en 1.0 el factor de servicio para motores totalmente cerrados. Un motor eléctrico donde su factor de servicio FS = 1,0 significa que el motor no fue proyectado para funcionar continuamente por encima de su potencia nominal, sin embargo, no cambia su capacidad para sobrecargas momentáneas [23].

2.8.4.7 Parámetros Ambientales

2.8.4.7.1 Altitud

Los motores eléctricos normalmente están diseñados para trabajar a alturas no mayores a los 1000 msnm (metros sobre el nivel del mar), motores que trabajan mayor a esta altura presentan problemas de calentamiento debido a la disminución de la densidad del aire y en consecuencia a la

¹³ NEMA, National Electrical Manufacturers Association

disminución de la capacidad de refrigeración del motor, debido a un deficiente intercambio del calor entre el motor y el aire que lo rodea [23]. Es así que la norma IEC 60034-1, especifica que la instalación de los motores eléctricos no debe exceder 1000 msnm.

2.8.4.7.2 Temperatura ambiente

Conforme IEC 60034-1, las condiciones usuales de temperatura de servicio en un medio refrigerante (en la mayoría de los casos, el aire ambiente) debe ser una temperatura no superior a 40 °C y exenta de elementos perjudiciales [23].

La temperatura llega a influir en la potencia del motor, reduciendo la potencia nominal al incrementarse la temperatura, reduce la vida útil del motor con el deterioro prematuro del aislamiento de los devanados, así también produce un deterioro en los rodamientos o cojinetes del motor produciendo un mayor esfuerzo mecánico lo cual se traduce en un incremento de la temperatura.

Una forma de mejorar el rendimiento del motor eléctrico si la temperatura ambiente es superior a la sugerida por la norma IEC y protegerlo ante fallas que esto puede producir, es manejando una relación entre la temperatura ambiente y la potencia del motor (ver tabla 2.8).

Tabla 2.8 Manejo de la temperatura con la reducción de la potencia del motor.

TEMPERATURA AMBIENTE	
Inferior o igual a 40°C	Potencia nominal del motor
Mayor o igual a 45°C	Reducir la potencia un 8%
Mayor o igual a 50°C	Reducir la potencia un 17%
Mayor o igual a 55°C	Reducir la potencia un 25%
mayor a 55°C	Consultar con el fabricante

Fuente: Elaboración propia.

Es importante destacar que los valores que se menciona en la anterior tabla son solo ejemplos y pueden variar según el motor específico y las recomendaciones del fabricante.

Capítulo 3 - INGENIERÍA DEL PROYECTO.

3.1 El motor eléctrico de inducción en la industria como caso de estudio

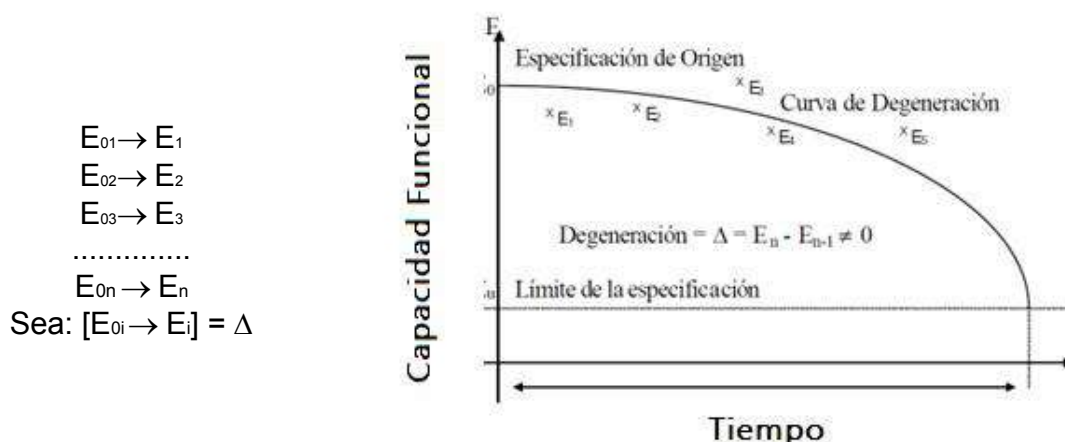
Los motores eléctricos de inducción están ampliamente disponibles en el mercado y se fabrican en una amplia variedad de tamaños, rango de potencias, y configuraciones. Esto lo hace adecuado para una amplia gama de aplicaciones, ocupando un papel muy importante en la industria representando una gran parte de los motores eléctricos utilizados.

3.2 Degeneración de los equipos y el motor eléctrico

Todo equipo, pieza, o componente que forma una máquina, es caracterizado por valores medibles al momento de su fabricación, e instalación, definiéndose a este conjunto de valores como condición inicial de la pieza, se llama Especificación de Origen identificada por $\{E_0\}$

La utilización y/o exposición de la pieza a agentes externos, hace que $\{E_0\}$ se transforme en $\{E\}$; donde aparece un Δ que es diferente de cero, indicándonos que la pieza y su valor podrá determinar una condición inaceptable de utilización [24].

Figura 3.1 Curva de Degeneración de un equipo.



Fuente: Lourival Augusto Tavares, *Administración moderna del mantenimiento*. Pág. 89.

En el contexto del mantenimiento de los motores eléctricos, hacemos referencia a el deterioro gradual y pérdida del rendimiento que se experimenta con el tiempo debido al desgaste, el envejecimiento y las condiciones de operación adversa a las que se someten. La degeneración está relacionada con varios factores que serán vistos y explicados posteriormente.

3.3 Factores que afectan la vida útil del motor

Existe un gran número de factores que pueden afectar la vida útil de un motor eléctrico y provocan el mal funcionamiento de los mismos. Tanto factores externos como internos pueden ser los causantes de disminuir su vida útil y un desgaste prematuro en sus componentes, causando anomalías que pueden provocar fallas hacia los equipos que acciona. También debemos tomar en cuenta que las fallas pueden provenir de equipos externos conectados al motor eléctrico.

Según la figura 3.10 que se presenta posteriormente, las fallas en los motores eléctricos se deben en su mayor parte a fallas en los rodamientos, seguido a las fallas que se producen en el devanado del estator y fallas externas.

3.4 Tipos de falla en motores eléctrico

Tomando puntos anteriormente tocados hacia las fallas de los componentes de un motor eléctrico que afectan en su funcionamiento óptimo, se hará una selección de los modos de falla según el tipo de problemas de los que estos puedan ser ocasionados, como ser problemas térmicos, mecánicos y eléctricos. La mayoría de las fallas en motores eléctricos pueden ser clasificados en dos grupos, fallas Eléctricas - aislamiento y fallas Mecánicas.

3.4.1 Fallas eléctricas – aislamiento

3.4.1.1 Corto circuito.

El corto circuito entre espiras es unas de las fallas más comunes q se presenta en los motores eléctricos, cortocircuitos entre espiras, cortocircuito entre fases, cortocircuito a masa en la ranura o borde de la ranura mencionados anteriormente se pueden llegar a manifestar de manera gradual

por el deterioro del material aislante que las recubre, o de forma instantánea por un incremento de temperatura demasiado elevado causado principalmente por corriente pico de larga duración, lo cual sobrepasa toda capacidad térmica del material que recubre al conductor eléctrico.

3.4.1.2 Anormalidades eléctricas

3.4.1.2.1 Variación de voltaje.

Un aumento o disminución afectan el funcionamiento del motor.

3.4.1.2.2 Bajo voltaje.

Si es considerable, la corriente nominal se incrementa, lo cual produce sobrecalentamiento.

3.4.1.2.3 Alto voltaje.

El alto voltaje de alimentación para el motor reduce las pérdidas en los devanados, pero el flujo magnético más intenso ocasiona mayores pérdidas en el núcleo.

Incremento de voltaje de suministro podría reducir la corriente de consumo, pero un valor mayor al 10% con respecto al valor de placa producirá saturación del hierro, aumentando de forma considerable la corriente, produciendo sobrecalentamiento en el motor [25].

3.4.1.2.4 Voltajes Transitorios.

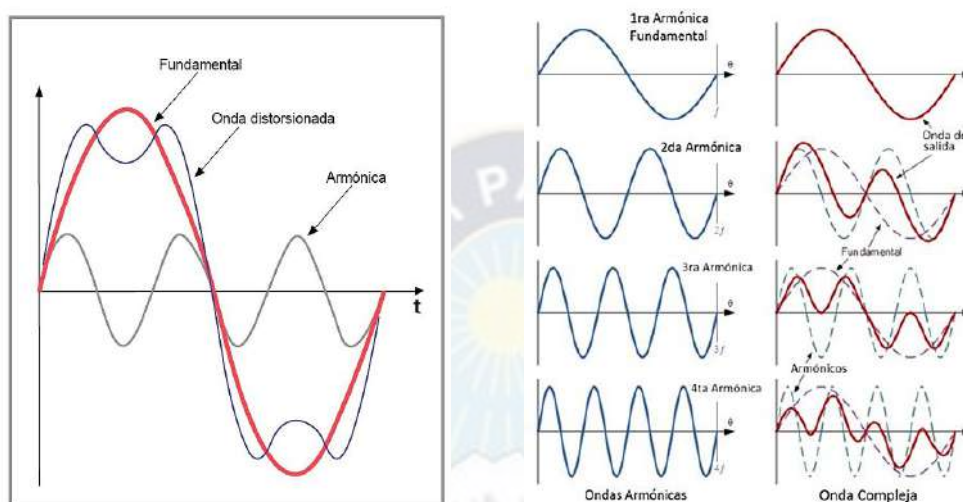
La tensión transitoria, entendida como los picos de tensión temporales indeseados dentro de un circuito eléctrico, suele provenir de distintas fuentes internas o externas a la planta. Dichas tensiones, las cuales varían en amplitud y frecuencia, pueden llegar a erosionar el aislamiento de los devanados del motor o hacer que este comience a fallar.

3.4.1.2.5 Distorsión armónica.

La distorsión armónica se refiere a la deformación periódica de la señal de voltaje o corriente fundamental, y es causada por el uso de cargas no lineales en el sistema eléctrico, como inversores, variadores de frecuencia y otros equipos. Este fenómeno que puede tener un impacto significativo en el funcionamiento y la vida útil de los motores eléctricos.

Puede provocar diversos problemas en los motores eléctricos, como sobrecalentamiento, aumento de las pérdidas en el núcleo magnético, vibraciones y desequilibrios en las fases. Estos problemas pueden resultar en posibles fallas y un deterioro prematuro de los motores.

Figura 3.2 Distorsión armónica.



Fuente: <https://www.secovi.com/blog/3/distorsion-armonica-de-corriente-vs-distorsion-armonica-de-voltaje>.

3.4.1.2.6 Corrientes de fuga

Denominamos corrientes de fuga a la corriente que fluye a tierra a través de un conductor de protección o por el contacto de una superficie conductora hacia tierra, en nuestro caso de estudio podría ser a través la carcasa del motor eléctrico, normalmente por daños en el aislamiento del conductor o alambre del bobinado. Estas fugas de corriente puede ser medidas o detectadas a través de mediciones y pruebas predictivas, como la *Medición de la Resistencia de Aislamiento*.

3.4.1.2.7 Señales PWM por variador de frecuencia – VDF

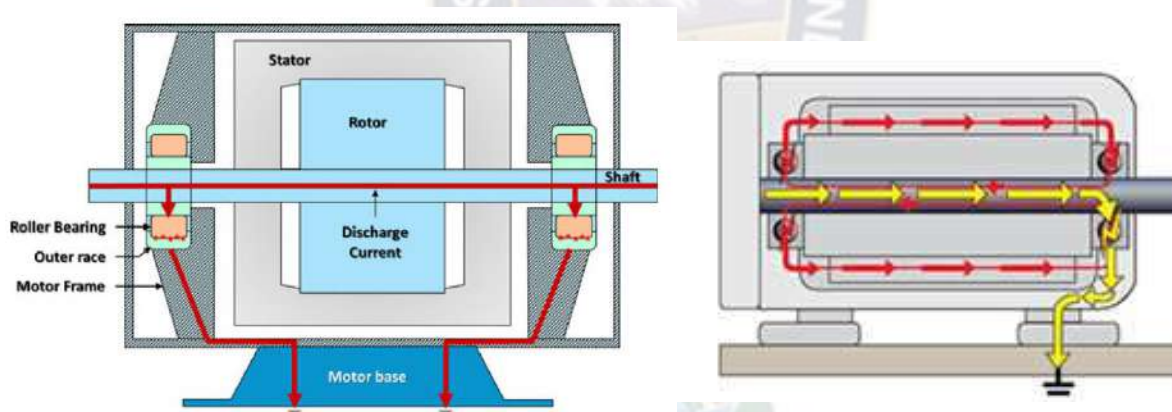
Los drivers para el accionamiento de motores eléctricos como VDF puede provocar desventajas si no se tiene las consideraciones adecuadas para su uso. Como ya se había mencionado, uno de los problemas del uso de un VDF es el incremento de la temperatura del motor, tanto por la reducción de su velocidad, como también por el tipo de técnica que usa el VDF para controlar la tensión y la

frecuencia (modulación de ancho de pulso - PWM). Estos dispositivos producen reflejos¹⁴, que son el retorno de parte de la señal hacia el origen; lo cual produce tensión en el aislamiento del devanado del motor con la posibilidad de provocar la ruptura del aislamiento del conductor.

3.4.1.2.8 Tensión en el eje del motor

Otro de los problemas que puede generarse por el uso de VDF es la aparición de tensiones pulsantes, que pueden acoplarse desde el estator al rotor del motor causando la aparición de voltaje en el eje del motor. Cuando el voltaje que aparece en el eje del rotor vence la capacidad de aislación de la grasa del rodamiento, se puede llegar a producir corrientes que lo atraviesan y provocando el deterioro del mismo, como consecuencia se produce fallas prematuras en el motor. Este fenómeno es conocido como Erosión Eléctrica - *Fluting*¹⁵, por su efecto en los rodamientos.

Figura 3.3 Dibujo esquemático de un motor mostrando el fenómeno eléctrico fluting.



Fuente: *Electrical Fluting of a Tri-Lobe Rolle Bearing*

¹⁴ Los Reflejos o también llamado Ondas Reflejadas se generan cuando hay una discrepancia en la impedancia entre la fuente y la carga. La onda reflejada es la sobretensión existente entre la salida del variador de velocidad y el motor, que puede llegar a ser hasta más de 2 veces el voltaje del bus de DC del variador de velocidad, definido como aumento de voltaje de salida en función del tiempo (dV/dt). Las discrepancias de impedancia pueden producirse como resultado de una instalación inadecuada, una selección inadecuada de componentes o una degradación de los equipos a lo largo del tiempo.

¹⁵ Fluting es un término utilizado por la falla que se produce en los rodamientos, cuya palabra viene del inglés y significa "acanaladura".

3.4.1.2.8.1 Erosión eléctrica (fluting)

La aparición de corrientes parasitas por el uso de VDF para el accionamiento de un motor eléctrico, nos conduce a la aparición de un nuevo tipo de falla que se manifiesta en el deterioro acelerado de rodamientos del motor mediante la erosión eléctrica, también denominado fluting.

El fluting es un tipo de daño que se produce en los rodamientos cuando a través de él pasa corriente eléctrica, produciendo daños en su superficie y la degradación del lubricante. Esta falla se manifiesta como una especie chispas o similar a un arco eléctrico en la parte interna del rodamiento, presentándose la aparición de deformaciones en forma de estrías a lo largo de la superficie de la pista o camino de rodadura (Ver figura 3.4).

Figura 3.4 Fluting - Erosión eléctrica en rodamientos



Fuente: <https://ivctechnologies.com/2021/05/02/continual-bearing-failures-on-your-drives-the-cause-might-surprise-you/>

3.4.1.2.9 Sobrecarga Eléctrica

Aunque la sobrecarga no es una falla netamente eléctrica, es una de las que más influencia tiene en el comportamiento térmico del motor, el cual es causa de fallas, averías y deterioro prematuro del aislamiento del conductor eléctrico que forman los bobinados tanto del estator como del rotor, así como el deterioro de partes mecánicas.

Hablamos de sobrecarga eléctrica cuando la falla del motor es a causa de voltaje excesivo, insuficiente o fluctuante en la fuente de energía o en el controlador del motor.

Según la norma IEC 60034-1, el motor eléctrico de inducción debe ser capaz de funcionar de manera satisfactoria cuando se alimenta con tensiones hasta 10% por encima o debajo de su tensión nominal, siempre que la frecuencia sea la nominal.

3.4.2 Fallas mecánicas

Se tiene gran cantidad de fallas mecánicas que pueden surgir o presentarse en un motor eléctrico. A continuación, se hace referencia a aquellos que mayores problemas pueden generar en el funcionamiento del motor y sus posibles causas.

3.4.2.1 Sobrecarga mecánica

La sobre carga mecánica son generadas generalmente por *exceso de carga*¹⁶, deterioro o mal funcionamiento de rodamientos, o desalineación con la carga, haciendo que el motor trabaje de forma forzada y fuera de sus capacidades mecánicas. Los principales síntomas serán un excesivo consumo de corriente, un torque insuficiente y sobrecalentamiento.

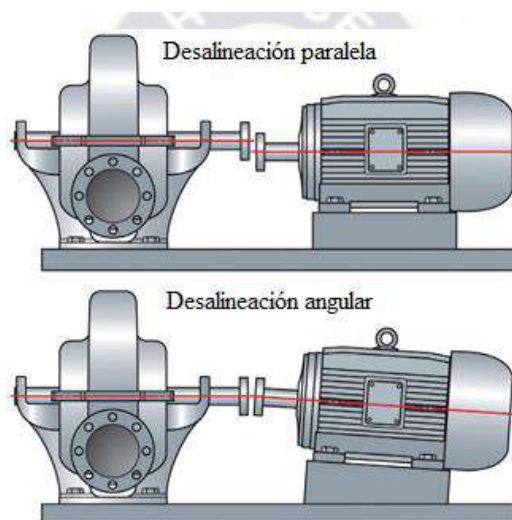
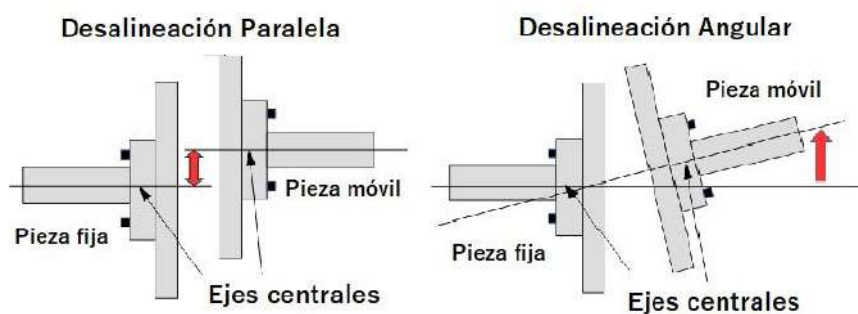
3.4.2.2 Desalineación

Producido cuando el eje del motor y la carga no se encuentran alineadas de forma correcta o el tipo de acople entre ambos esta desalineado. A pesar de que se utilizan acoplamientos flexibles para corregir dicho error, estos también generan y transmiten fuerzas cíclicas dañinas hacia el motor, produciendo un aumento en la carga mecánica aparente y transmitiendo vibraciones entre el motor y la carga.

Consideraremos dos tipos de desalineación: Paralela y Angular. Cuando los ejes están alineados ambos desalineamientos desaparecen. La alineación se hace en 2 planos, el vertical y el horizontal. Por lo general alineamos el eje del motor con el eje de la maquina cualquiera esta sea (compresor, bomba, chancador, torno, tornillo sin fin, etc.) ya que estas máquinas por lo general no se pueden mover, quedando el movimiento de alineación limitado al motor.

¹⁶ Exceso de carga. Carga demasiado pesada que aumenta el toque del motor excediendo del torque nominal, lo cual puede llegar a frenar al mismo.

Figura 3.5 Desalineación de motores eléctricos



Fuente: <https://motoresygeneradores.com/alineacion-y-sus-tolerancias/>

Las razones para tener los equipos alineados son:

- Disminución del desgaste de rodamientos, cojinetes, engranajes, sellos, etc.
- Reducción de las vibraciones.
- Disminución del consumo de energía.
- Ejercicio de la garantía (los fabricantes lo requieren muchas veces).
- Mayor confiabilidad del equipo.

No alinear correctamente los ejes o las correas aumentará la cantidad de tensión en los equipos, lo que resultará en una variedad de problemas potenciales, tales como:

- Mayor fricción, lo que resulta en un desgaste excesivo, un consumo excesivo de energía y la posibilidad de una avería prematura del equipo.
- Desgaste excesivo de rodamientos y sellos, lo que también provoca fallas prematuras.
- Fallo prematuro del eje y del acoplamiento.
- Fugas excesivas de lubricante en el sello.
- Fallo en el acoplamiento y en los pernos de cimentación.
- Mayor vibración y ruido.

3.4.2.3 Desequilibrio del eje

Entendemos por desequilibrio a el movimiento de una pieza del cual su centro de masa no se encuentra en su eje de rotación. Aunque no es posible lograr un grado de equilibrio absoluto, se intenta tener un grado de desequilibrio que no afecte de gran manera en el funcionamiento del motor, tratando de tener un funcionamiento suave y eficiente.

3.4.2.3.1 Excentricidad

En motores eléctricos la excentricidad es una falla en la simetría rotórica del rotor respecto al estator, y se presenta cuando el espacio entre el rotor y el estator no es uniforme a lo largo de sus 360°. La excentricidad puede ser a causa de diferentes motivos, algunos de ellos asociados a fallas de fabricación y ensamble del motor, y otras a los sistemas de accionamientos acoplados al eje del motor (correas, poleas, cargas mecánicamente desbalanceadas) [26], la cual llega a manifestarse como vibraciones mecánicas y variación del campo magnético del entrehierro (atracción magnética desbalanceada), que pueden llegar a provoca fallas en su funcionamiento.

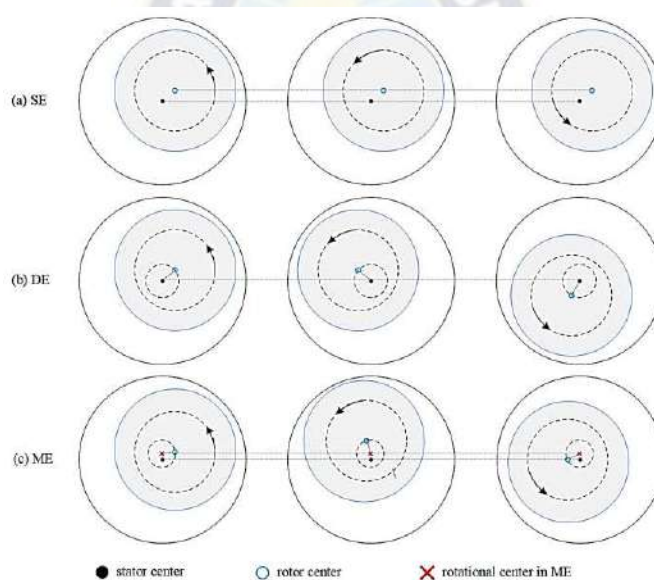
Si lo consideramos como falla de variación del campo magnético causado por la falta de uniformidad de entrehierro¹⁷, tendríamos como consecuencia valores de reluctancia variable, lo cual generaría armónicos en el campo magnético. Por otra parte, como una falla mecánica esta presentaría efectos no deseados en la parte constructiva del motor: aumento en la fricción, desgaste

¹⁷ El espacio que existente entre el estator y el rotor se conoce como entrehierro.

en rodamientos, falla entre espiras y/o tierra, desvío o aumento de la desviación del eje, siendo la falla más crítica el contacto entre el rotor y el estator.

Se clasifica tres tipos de excentricidad: La excentricidad dinámica (DE) cuando el rotor orbita en el estator y se presenta por fallas o desgaste en los rodamientos, curvatura del eje, malformación del rotor; la excentricidad estática (SE) que está relacionado con el rotor descentrado en el estator que genera una serie de componentes armónicos de baja frecuencia en forma de bandas laterales alrededor de la frecuencia fundamental; y la excentricidad mixta (ME) que es la combinación de las anteriores [27].

Figura 3.6 Tipos de excentricidad en motores eléctricos.

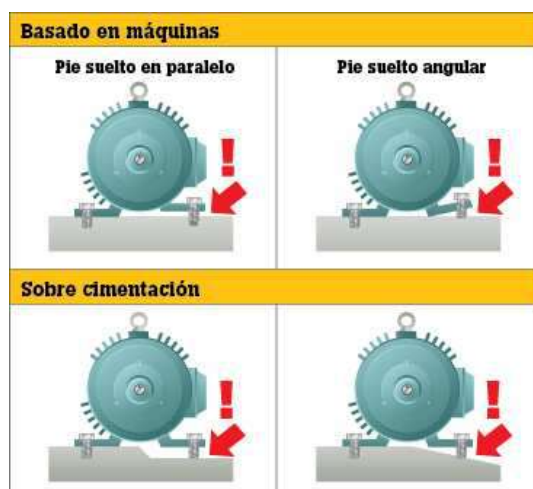


*Fuente: Zijian Liu, Motor eccentricity.
<https://encyclopedia.pub/entry/12700>*

3.4.2.4 Instalación inadecuada

A pesar de que la instalación involucra la alineación del motor, un factor importante a tomar en cuenta es la superficie sobre la cual se encuentra montada en motor. Un mal diseño de esta superficie puede llevarnos a tener errores en el momento de realizar el acople, la alineación dándonos como resultado un mal funcionamiento produciendo esfuerzos a causa de la fijación defectuosa del motor a su punto de anclaje.

Figura 3.7 Mala instalación de Motor eléctrico

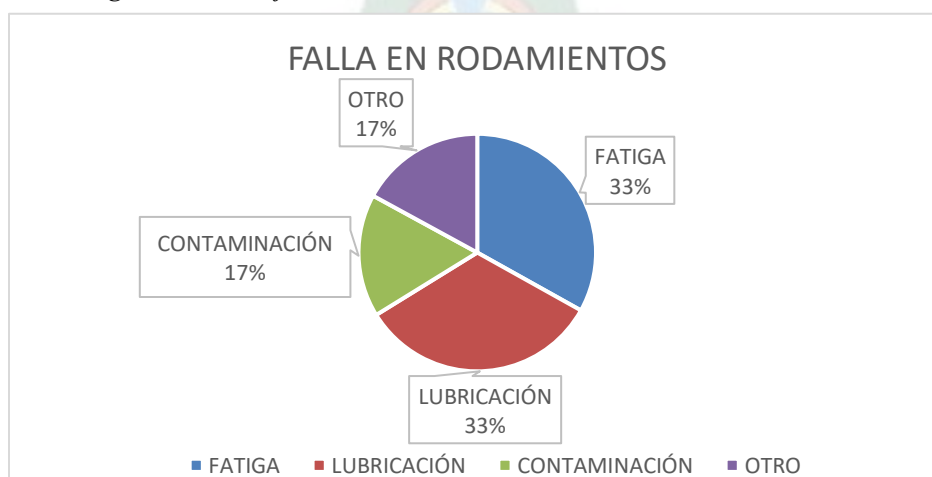


Fuente: <https://www.fluke.com/es-es/informacion/blog/motores-accionamientos-bombas-compresores/13-causas-comunes-del-fallo-del-motor>

3.4.2.5 Desgaste en los rodamientos

Un desgaste de los rodamientos a causa de pérdida de lubricación, sobre esfuerzos, o simplemente por un desgaste normal llega a provocar a que estos sean menos eficientes en su funcionamiento, produciendo calentamiento, problemas mecánicos, vibraciones, ruido; acelerando así el fallo del motor. También de forma externa a su funcionamiento la mayor parte de las fallas mencionadas en subtítulos anteriores se traducen en una falla directa hacia los rodamientos; algunas van a afectar principalmente al rodamiento que está al lado de la carga.

Figura 3.8 Clasificación SKF – Modos de Falla de Rodamientos



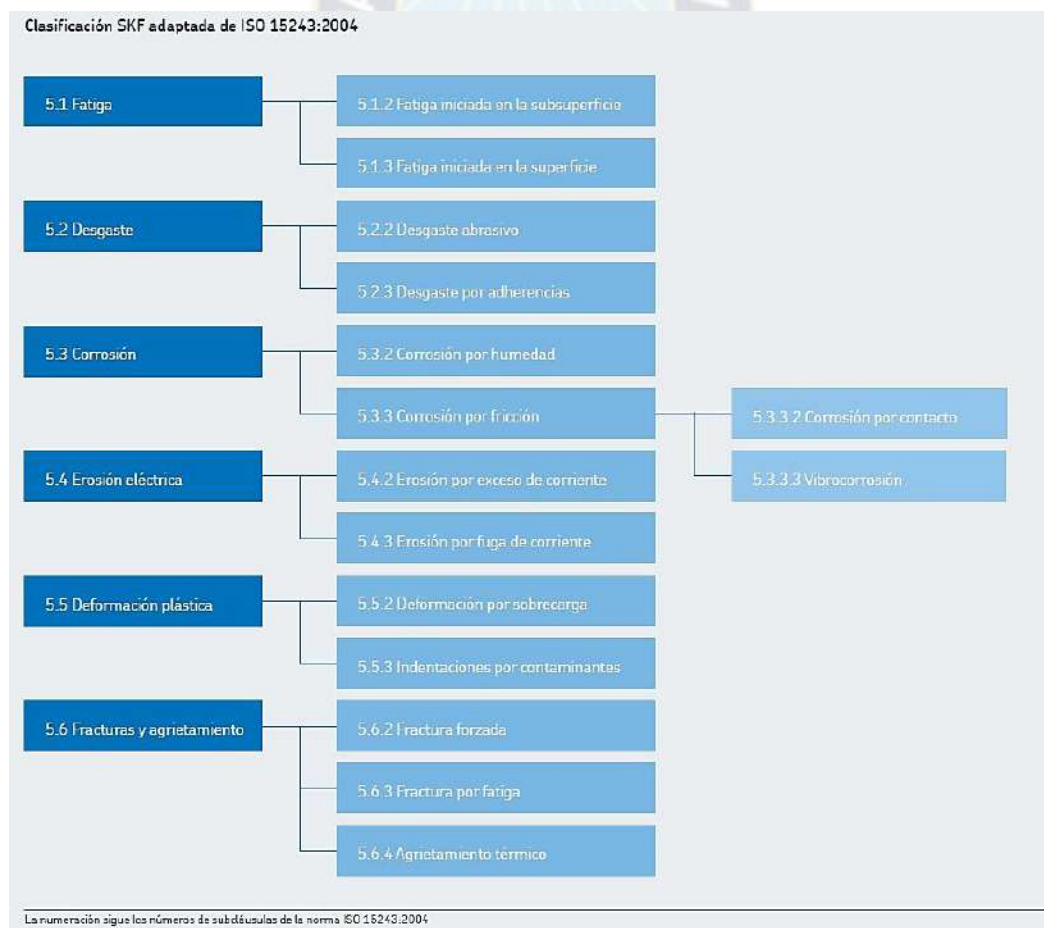
Fuente: SKF, Elaboración propia

Según estudios de la empresa SKF, hay varias razones por las que los rodamientos se pueden dañar o fallar. Hablando en general:

- 1/3 falla debido a fatiga.
- 1/3 falla debido a problemas de lubricación (lubricante, cantidad o intervalo de lubricación incorrectos).
- 1/6 falla debido a la contaminación (sellos ineficaces).
- 1/6 falla por otros motivos (manipuleo y montaje incorrectos, carga más pesada o distinta de la anticipada, ajustes incorrectos o inadecuados).

Existe un gran número de los modos de falla que se pueden producir en un rodamiento, para lo cual SKF hace una clasificación según la Norma ISO 15243:2004.

Figura 3.9 Clasificación SKF – Modos de Falla de Rodamientos.



Fuente: Fallas de rodamientos SKF.

3.4.3 Fallas por factores externos

Siendo uno de los principales problemas de fallas en los motores eléctricos, los factores externos pueden llegar a causar anomalías en funcionamiento provocando su deterioro prematuro.

Fallas mencionadas anteriormente como ser: la mala alineación, vibraciones externas, condiciones ambientales inadecuadas, alimentación eléctrica deficiente hacia el motor deben ser considerados, monitoreados y corregidos para su buen funcionamiento.

3.4.4 Fallas por factores internos

Podemos decir que las fallas por factores internos son aquellas que son producidas por las partes que conforman el motor eléctrico. Tanto partes móviles como estáticas pueden producir problemas en su funcionamiento, los cuales pueden producir desde un desgaste prematuro del motor, hasta producir un paro forzado, pudiendo dejar de funcionar¹⁸ y provocando una falla crítica del equipo al que este acciona.

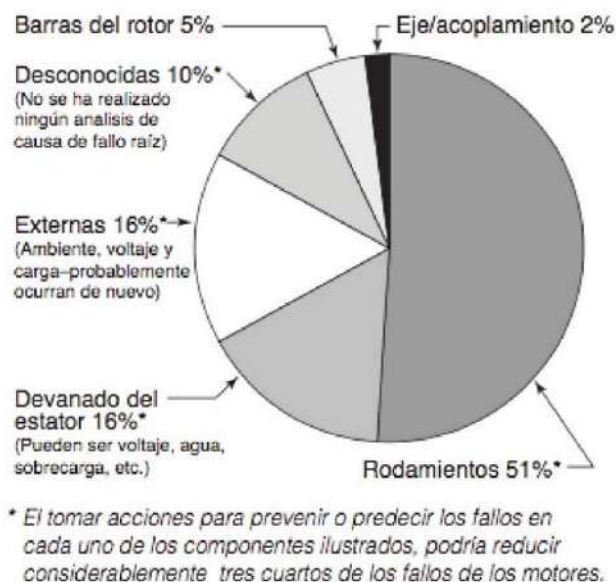
Partes como carcasa, estator, rodamientos, rotor, ventilador, aislamiento, devanados, eje, pueden ser causa de falla si no se realiza un adecuado mantenimiento y/o monitoreo del estado de los mismos.

3.4.4.1 Fallas en los componentes del motor

Como se vio en el Capítulo 2 – “Partes constructivas de un motor de CA”, el motor eléctrico consta de partes móviles y fijas en su construcción, de los cuales podríamos hacer una selección de criticidad hacia la posibilidad de falla del motor por diferentes factores que pueden ser causa de falla. Mencionaremos las partes más críticas que pueden provocar una falla en el motor eléctrico, las cuales serán caso de estudio.

¹⁸ Por factores como agripamiento, falla en rodamientos, polos quemados, campo quemado, entre otros factores que se tocara más adelante.

Figura 3.10 Fallas en el motor eléctrico.



Fuente: International Copper Association Mexico, Guía para la reparación de motores eléctricos trifásicos.

3.4.4.2 Partes del motor eléctrico con probabilidad de falla

3.4.4.2.1 Rodamientos

Los rodamientos son componentes principales de un motor debido a su función como apoyos dinámicos en máquinas rotativas. Estos rodamientos están sometidos a constante esfuerzo tanto axial y radial, y operan a altas velocidades. Sin embargo, debido a la exigencia de su funcionamiento, están expuestos a diversos factores que pueden comprometer su integridad.

Entre los problemas que pueden afectar los rodamientos comprometiendo su rendimiento y vida útil se encuentran el calentamiento excesivo, la aparición de fisuras y, en casos extremos, la destrucción de los mismos debido a un uso inadecuado o mal funcionamiento. Estos problemas pueden surgir por diversas razones, como una lubricación inadecuada, la presencia de contaminantes, desalineación, desbalanceo, almacenamiento incorrecto, manipulación inadecuada, siendo estos causantes de falla en los motores eléctricos.

3.4.4.2.2 Estator

El estator al ser una parte estática del motor eléctrico la cual aloja a los bobinados estatóricos, que al ser alimentados con la tensión de red para la cual han sido diseñados, estos presentan un calentamiento normal en funcionamiento, el mismo puede estar expuesto a daños físicos, sobrecalentamiento, altas temperaturas, desequilibrio de voltajes, rotura de soportes. También es importante mencionar que el estator este alojado en la parte interna de carcasa del motor, por lo cual parte de su refrigeración depende de esta, de lo cual se hablara posteriormente.

3.4.4.2.3 Rotor

Una de las partes más importantes del motor eléctrico es el rotor. Siendo la parte móvil del motor y estar diseñado para funcionar a altas velocidades en un uso frecuente, está expuesto a grandes posibilidades de falla. Problemas dinámicos como desbalanceo, contaminación, problemas térmicos como calentamiento en su devanado o por rozamiento del estator con el rotor, daño físico, instalación inadecuada, son algunas de las causas que pueden llevar a un mal funcionamiento o probable falla, sin dejar de lado que su correcto funcionamiento está en función de las partes con las que este está ensamblado como el eje, y los rodamientos que le dan su posición de funcionamiento, los cuales pueden sufrir estrés por desbalanceo. Entre las fallas más comunes se tiene los cortocircuitos entre espiras, cortocircuito entre fases, cortocircuito a masa en la ranura o borde de la ranura.

3.4.4.2.4 Eje

El eje del motor es la parte que construye el centro de rotor, y este se acopla a la carga que acciona, soportando toda fuerza que se ejerce en este acople; es por eso que se lo considera como una parte crítica en la cual debemos tomar en cuenta los modos de falla que se pueden presentar como daños físicos, instalación incorrecta, fabricación inadecuada entre otros.

3.4.4.2.5 Ventilador

Los ventiladores que ayudan a mantener una temperatura adecuada en el motor eléctricos, también son parte importante que en caso de falla puede causar la avería en otros componentes

como en bobinados y rodamientos. Fallas por daños físicos del ventilador, deterioro según el material del que esté construido, fisuras, obstrucción, pueden ser causa de falla que pueden conducir a el paro del equipo.

3.4.4.2.6 Carcasa

La carcasa del motor es una parte que aloja a los componentes del motor en la cual se instala la cubierta del ventilador, rodamientos del rotor, estator, etc., por lo cual también puede ser causa de falla si no toman todas las medidas de mantenimiento correspondientes. Fallas por mala instalación o ajuste en el lugar de trabajo, superficie irregular que provoca inestabilidad en su funcionamiento o exceso de vibración, aumento de la temperatura del motor por falta de limpieza de la carcasa, son algunas de las condiciones que nos pueden conducir a una falla del motor eléctrico los cuales muchas veces no se los toma en cuenta.

3.5 Causas de falla en motores eléctricos

La falla de un motor eléctrico de inducción puede ser atribuido a diversas causas. En la tabla 3.1 se trata de englobar las causas de fallas más representativas, según las diferentes características de funcionamiento presentes cuando estos se presentan en servicio. Así también, de manera complementaria la tabla 3.2 detalla los tipos de fallas, sus causas subyacentes y las posibles consecuencias que se pueden presentar en el motor. Esto, nos permite la identificación más precisa de los factores involucrados, con información valiosa para la toma de decisiones de mantenimiento.

Figura 3.11 Falla en el motor eléctrico.



Fuente. <https://www.motorlan.es/es/cuando-un-motor-electrico-falla-en-el-mantenimiento-preventivo/>

Tabla 3.1 Causas de Falla en Motores Eléctricos

Causas de fallas en el motor eléctrico						
Fallas en el estator	causas térmicas	causas eléctricas	causas mecánicas	causas estáticas - dinámicas	causas magnéticas	causas ambientales
	variación de tensión	Dieléctrico (material aislante)	movimiento de espiras	Mala instalación de motor	Asimetría magnética	Partículas externas solidas
	tensión de fase desbalanceada	efecto corona	contacto entre estator y rotor	Superficie irregular de instalación	Saturación de las laminas	Partículas externas liquidas
	arranques cíclicos	Sobretensión de corta duración	Contacto entre espiras	Soportes de motor en mal estado	Corrientes circulantes	Causas climáticas Humedad, condensación
	Sobrecarga Térmica	Variación de voltaje	Carga excesiva	Selección de motor inadecuado	Entrehierro no uniforme	Temperatura ambiente excesiva
	obstrucción del sistema de ventilación	Ruido eléctrico	Excentricidad dinámica y estática	Geometría inadecuada de rotor y estator		
	Zonas calientes	Fallas en los sistemas de control				
Fallas en el rotor	causas térmicas	causas eléctricas	causas mecánicas	causas estáticas - dinámicas	causas magnéticas	causas ambientales
	sobrecarga térmica	Incremento de corriente en rotor	desprendimiento de chapas	Rodamientos defectuosos	efecto electromagnético	Contaminación en lubricación de rodamientos
	desbalanceo térmico	Fluting	incorrecto ajuste del eje / eje torcido	Desalineación	atracción electromagnética desbalanceada	Obstrucción de ventilador de motor
	obstrucción del sistema de ventilación	Pitting	fallo en rodamientos	torque excesivo en el eje	Ruido electromagnético	Partículas sólidas impregnadas en rotor
	Rotor bloqueado	Frosting	Contacto entre espiras	sobre velocidad	Vibración electromagnética	
	Zonas o punto calientes		Desalineación de eje	bloqueo de rotor **		
*	CALENTAMIENTO		VIBRACIÓN		RUIDO	

Fuente: Elaboración propia.

3.6 Modos y efectos de fallas en motores eléctricos

Tabla 3.2 Modos y Efectos de Falla en Motores Eléctricos

MODOS Y EFECTOS DE FALLA		
TIPO FALLA	CAUSA	CONSECUENCIAS
Corto circuito	Sobrecarga Sobre tensión Sobrecalentamiento	<ul style="list-style-type: none"> • Deterioro de Aislamiento • Contacto entres espiras • Deterioro de bobinados de estator y rotor (motor quemado)
transitorios de tensión	Picos de tensión temporales procedentes de fuentes externas induciéndose al motor por el sistema de distribución o sistema de control.	<ul style="list-style-type: none"> • Deterioro de los bobinados. • Ruptura del aislamiento del bobinado provocando falla del motor prematuro.
Desequilibrio de fases	Mala distribución de cargas en el sistema trifásico.	<ul style="list-style-type: none"> • Se puede generar vibraciones no deseadas en el motor. • Aumento de corriente por desequilibrio de la fase que provoca mayor calentamiento en esa parte del motor.
Distorsión Armónica	Uso de drivers o accionadores como VDF o Arrancador Suave que inducen señales no deseados.	<ul style="list-style-type: none"> • Calentamiento en bobinados por corrientes parasitas. • Vibraciones en el motor por frecuencias diferentes a la natural.
Variaciones de tensión (voltaje)	Fluctuaciones en red de alimentación del motor	<ul style="list-style-type: none"> • Perdida de potencia en torque de motor, incrementando la corriente en bobinados (calentamientos). • Incremento e tensión produce saturación del campo magnético traduciéndose en calentamiento.
Voltajes transitorios	Ruido proveniente de la red o equipos adyacentes que ingresan al motor	<ul style="list-style-type: none"> • Transitorios de amplitud considerable provocan el deterioro del aislamiento del bobinado.
Corrientes de fuga	Subidas de tensión e interferencias generados por equipos electrónicos con filtros conectados a la red.	<ul style="list-style-type: none"> • Deterioro del aislamiento en bobinado des estator y rotor • Deterioro de rodamientos por circulación de corriente de fuga. • Disparo de protección por fuga de corriente a tierra.

MODOS Y EFECTOS DE FALLA		
TIPO FALLA	CAUSA	CONSECUENCIAS
Reflejos por señales PWM	Se generan cuando hay una discrepancia en la impedancia entre la fuente y la carga. Las discrepancias de impedancia pueden producirse como resultado de una instalación inadecuada, una selección inadecuada de componentes o una degradación de los equipos a lo largo del tiempo.	<ul style="list-style-type: none"> • Deterioro de aislamiento en bobinado • ruptura en el aislamiento del bobinado • fugas de corriente
Tensión del eje del motor	Tensión de eje exceden la capacidad de aislación de la grasa se rodamiento.	<ul style="list-style-type: none"> • Ruido en rodamientos del motor. • Sobrecalentamiento por aumento de la fricción en rodamientos. • Avería y posible destrucción de los rodamientos.
Sobrecarga operativa	<ul style="list-style-type: none"> • Carga excesiva en eje del motor • Exceso en consumo de corriente • Par insuficiente 	<ul style="list-style-type: none"> • Sobrecalentamiento • Deterioro de aislamiento de bobinados. • Deterioro de rodamientos • Disminución de vida útil de motor.
Desalineación	<ul style="list-style-type: none"> • Mala alineación entre eje motor y carga • Mala instalación de acople motor-carga o en mal estado. 	<ul style="list-style-type: none"> • Vibraciones en eje de motor y carga.
Desequilibrio de eje	<p>Centro de masa de rotor no se encuentre en su eje de rotación, saliendo de rango normal por:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Acumulación de suciedad. • Falta de contrapeso. • Mala reparación de motor. • Masa desigual en bobinados de motor. 	<ul style="list-style-type: none"> • Desgaste prematuro en partes mecánicas de motor (principalmente en rodamientos). • Vibraciones en motor. • Avería prematura en funcionamiento
Excentricidad estática	Inapropiado montaje del rotor con respecto al centro del estator.	<ul style="list-style-type: none"> • Causa radial sobre el motor. • Fuerza constante y en una sola dirección. • Vibraciones a ciertas frecuencias. • Rose entre estator y rotor.
Excentricidad dinámica	Posible curvatura del eje, malformación del rotor, rodamientos desgastados o desalineados, entre otros.	<ul style="list-style-type: none"> • Causa radial sobre el motor. • Fuerza que gira a la velocidad de rotación del motor. • Rose entre estator y rotor. • Vibraciones a ciertas frecuencias.

Fuente: Elaboración propia

3.7 Parámetros importantes de un motor eléctrico para un adecuado mantenimiento

Los motores eléctricos cuentan con parámetros establecidos por el fabricante, los cuales determinan la aplicación o uso que podemos darles. El voltaje, la corriente, velocidad, el aislamiento, son algunos de los parámetros que nos ayudan a identificar características de su funcionamiento. Otros parámetros importantes en tener en cuenta son la temperatura, vibración, nivel de ruido, lubricación, los cuales nos permiten realizar un mantenimiento adecuado haciendo un seguimiento del comportamiento del motor eléctrico con la adquisición de los datos que podemos obtener.

Estos parámetros deben ser considerados y tomados en cuenta en el mantenimiento del motor eléctrico para garantizar prevenir fallas inesperadas y prolongar la vida útil del motor, tomando en cuenta recomendaciones de fabricación, y datos anteriormente obtenidos. La adquisición de datos que se puede generar de estos parámetros al realizar o monitorear deben ser almacenados para un estudio y análisis posterior.

3.8 Instrumentación aplicable a los motores eléctricos

La norma ANSI/ISA-S51.1¹⁹ define instrumentación a una colección de instrumentos, dispositivos, hardware²⁰, o funciones²¹ y su aplicación con el propósito de medir, monitorear o controlar un proceso o máquina industrial, o cualquier combinación de estos.

En la actualidad existe una gran variedad de instrumentación que nos ayudan a identificar los parámetros de los equipos, poder obtener datos, modificarlos o controlarlos cuando estos se encuentran en funcionamiento. Para tal fin estos llegan a clasificarse según la función que cumplen en el proceso de automatización.

3.8.1 Clasificación de los instrumentos

Como es lógico, puede haber varias formas de clasificar los instrumentos, existiendo dos clasificaciones básicas, una relacionada con la función del instrumento y la otra con la variable del proceso.

¹⁹ Norma ISA 5.1: (International Society of Automation) – Identificación y Símbolos de Instrumentación

²⁰ Equipo físico directamente involucrado en la realización de funciones de medición, monitoreo y control

²¹ El propósito de, o la acción realizada por, un dispositivo o software de aplicación

Ya que nuestro enfoque es introducir la teoría de la instrumentación hacia el motor eléctrico, tomaremos aspectos direccionados para este fin. En la tabla 3.3 encontramos los diferentes tipos de instrumentos utilizados y que pueden ser aplicados en un motor eléctrico.

Tabla 3.3 Instrumentos utilizado en Motores Eléctricos.

Tipo de Instrumento	VARIABLES MEDIDAS	USO EN MOTORES DE INDUCCIÓN
Medidores de Corriente	Corriente	Monitorización de corriente para detectar sobrecargas y desequilibrios en fases.
Medidores de Tensión	Tensión (Voltaje)	Verificación de la tensión suministrada y detección de variaciones anormales.
Termistores	Temperatura	Detección de sobrecalentamiento para activar sistemas de protección y evitar daños en el motor.
Medidores de Aislamiento	Resistencia de aislamiento	Control del estado del aislamiento entre bobinas y tierra para prevenir fallas eléctricas.
Medidores de Vibración	Vibración	Monitoreo de vibraciones para identificar desequilibrios, desalineaciones o fallos en los rodamientos.
Analizadores de Potencia	Potencia, factor de potencia	Evaluación de la eficiencia energética, detección de problemas de potencia y ajuste del factor de potencia.
Analizadores de Armónicos	Armónicos	Detección y análisis de armónicos en la alimentación para evitar daños y asegurar un funcionamiento óptimo.
Sensores de Velocidad	Velocidad de rotación	Control y monitoreo de la velocidad de rotación para ajustes precisos y detección de desviaciones.
Analizadores de Firma	Firma eléctrica	Análisis de la firma eléctrica del motor para identificar fallos o desgastes en los componentes internos.
Medidores de Humedad	Humedad	Monitoreo de la humedad ambiental para prevenir la entrada de humedad y proteger el aislamiento del motor.
Sensores de Presión	Presión	Medición de la presión de refrigerante o lubricante para garantizar un funcionamiento adecuado del motor.
Medidores de Nivel	Nivel de líquidos o aceite	Control del nivel de líquidos o aceite en sistemas de lubricación o enfriamiento para evitar daños por falta de lubricación.
Sensores de Posición	Posición del rotor o partes móviles	Detección de la posición del rotor para sincronización, control de velocidad y monitoreo de posición angular.
Analizadores de Calidad	Calidad eléctrica (armónicos, flicker, etc.)	Análisis de la calidad eléctrica para garantizar un suministro adecuado y prevenir daños al motor.
Monitores de Estado	VARIABLES MÚLTIPLES (corriente, temperatura, vibración, etc.)	Integración de múltiples sensores para un monitoreo integral del estado del motor.

Fuente: Elaboración Propia

Según la función del instrumento podríamos llegar a clasificarlos en tres grupos: *medición, control y monitoreo*.

3.8.1.1 Instrumentos de Medición

Son aquellos que cumplen la función de medir los parámetros que caracterizan a un equipo, entre los cuales los más utilizados son: amperímetro, voltímetro, tacómetro, óhmetro, vibrómetro, sensores de temperatura, etc.

3.8.1.1.1 Medidores de temperatura

La medición de la temperatura es una de las variables más comunes en un proceso industrial ya que todos los fenómenos físicos están afectados por ella. En la siguiente tabla damos un resumen de la variedad de dispositivos capaces de medir temperatura (ver Tabla 3.4), con una clasificación según su tipo de funcionamiento.

Tabla 3.4 Dispositivos de medición de temperatura.

Tipo de Funcionamiento	Descripción	Ejemplos
Eléctricos	Utilizan la variación de propiedades eléctricas con la temperatura para medir el valor.	Termopares, termistores, RTD (Detector de resistencia térmica), termistores, diodos térmicos, sensores de silicio con efecto resistivo.
Mecánicos	Se basan en la expansión o contracción de materiales en respuesta a los cambios de temperatura.	Termómetros de expansión de gas, termómetros bimetálicos.
Radiación térmica	Detectan la radiación térmica emitida por un objeto para determinar su temperatura.	Pirómetros de radiación (óptico, pasabanda), termómetros infrarrojos, cámara termográfica.

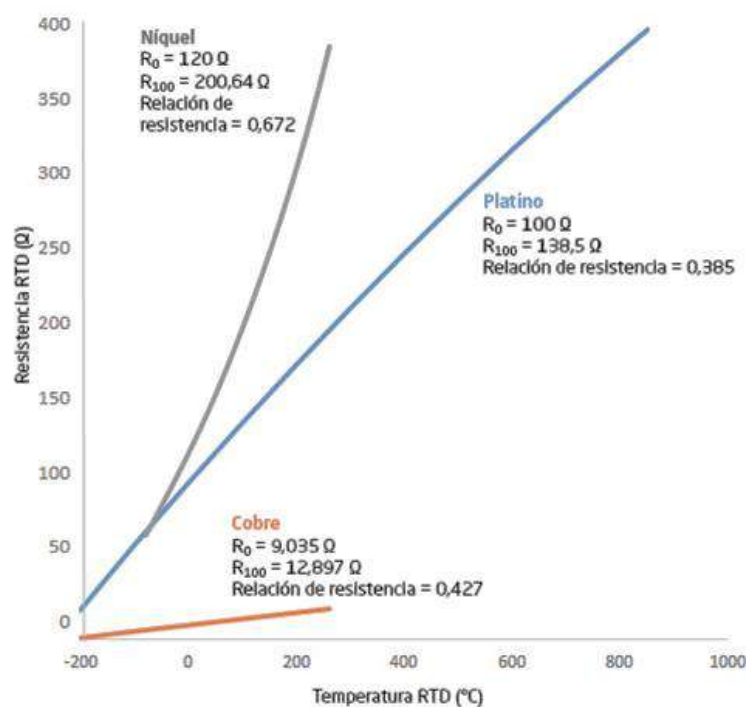
Fuente: Elaboración Propia

3.8.1.1.1 Sensores de temperatura

Detector de temperatura por resistencia (RTD)

Un detector de temperatura RTD – Resistance Temperature Detector por sus siglas en inglés, es un sensor de temperatura resistivo. Es una termorresistencia que basa su funcionamiento en la variación de la resistencia de un conductor (platino, cobre, níquel) por la temperatura. Las termorresistencias de platino son las que presentan mayor estabilidad y de mayor precisión [28].

Figura.3.12 Curvas R vs T de los tipos de RTD

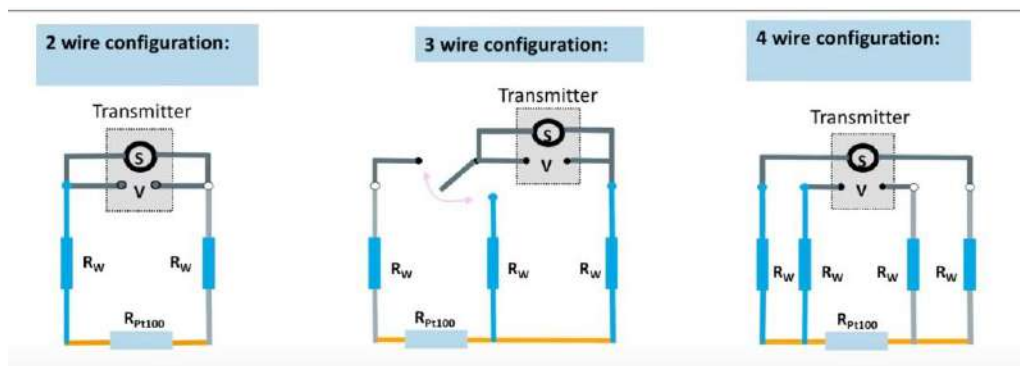


Tipos de RTD - Pt vs Ni vs Cu

Fuente: PR Electronics.

Los sensores más utilizados son los RTD de 100 a 1000 ohmios, entre los cuales el PT100 es de mayor aplicación en la industria. También se debe tener en cuenta el número de hilos, se pueden encontrar con circuitos de 2, 3 y 4 hilos en función de la aplicación, de la instrumentación asociada y de los requisitos de precisión (ver figura 3.13), siendo el de 3 hilos el de mayor uso industrial.

Figura.3.13 RTD- Tipos de cableado según su número de hilos



Fuente: <https://electrotec.pe/blog/RTDvsTERMOCUPLA>

Entre sus características podríamos mencionar su relativa inmunidad al ruido eléctrico, rango amplio de medidas, gran respuesta lineal entre la temperatura del sensor y la resistencia con diferentes estructuras de construcción (ver figura 3.14).

PT100:

El PT100 es el tipo más común de RTD. Fabricado de platino y con una resistencia eléctrica de 100 ohmios a una temperatura de 0°C; dichas características le dan el denominativo PT-100.

Figura.3.14 Estructura de los RTDs.



Fuente: <https://www.preelectronics.com/es/los-fundamentos-de-los-sensores-de-temperatura-rtd/>

la norma IEC 60751²² da una clasificación y especifica los valores de tolerancia de los sensores RTD industriales, definiendo cuatro clases de tolerancia: Clase AA, A, B Y C. La tolerancia debe estar dentro de un rango de temperatura especificado para cada clase (Ver tabla 3.5).

Tabla 3.5 Dispositivos de medición de temperatura.

Clases de tolerancia	Rango de temperatura de validez °C		Tolerancias ^a °C
	Resistencias bobinadas	Resistencias de láminas	
AA	-50 a +250	-0 a +150	$\pm (0.1 + 0.0017 t)$
A	-100 a +450	-30 a +300	$\pm (0.15 + 0.002 t)$
B	-196 a +600	-50 a +500	$\pm (0.3 + 0.005 t)$
C	-196 a +600	-50 a +500	$\pm (0.6 + 0.01 t)$

^a $|t|$ = módulo de la temperatura en °C sin tener en cuenta el signo

Fuente: Norma IEC-60751

3.8.1.1.2 Medidores de vibración

Los medidores de vibración son utilizados para medir vibraciones y oscilaciones en muchas maquinas e instalaciones, proporcionándonos parámetros como: desplazamiento, velocidad y aceleración que representan el movimiento detectado por los monitores de vibración [29].

3.8.1.1.2.1 Sensores de vibración

Los sensores de vibración son dispositivos que tienen la capacidad de transformar un fenómeno físico como la vibración mecánica en una señal eléctrica proporcional a la magnitud medida. La señal eléctrica de salida y la magnitud física original o de entrada se define como sensibilidad del transductor. Los sensores de vibración están formados básicamente por un transductor de vibración, y una unidad electrónica para procesar la información y luego enviarla a la interfaz externa.

Existe una gran variedad de sensores que nos dan la capacidad de medir vibraciones, para diferentes aplicaciones y condiciones de funcionamiento (Ver tabla 3.6).

²² IEC 60751 - Termómetros industriales de resistencia de platino y sensores de temperatura de platino

Tabla 3.6 Tipos de Sensores de Vibración.

TIPO DE SENSOR DE VIBRACIÓN		CARACTERÍSTICA
Acelerómetro	Capacitivo Piezoresistivo Piezoeléctrico	Sensor más popular para el monitoreo de máquinas. Mide y analiza la aceleración lineal y angular.
Sensor de velocidad		Utilizan un sistema electromagnético (bobina e imán) para generar la señal de velocidad. Tiene menor sensibilidad a las vibraciones de alta frecuencia que los acelerómetros. Normalmente usados para medidas de baja frecuencia
Sensor de proximidad o desplazamiento		Este transductor genera un campo magnético el cual se ve afectado al acercarse a un material conductor, siendo este cambio el que es cuantificado y es medido como voltaje.
Sensores Triaxiales		constan de tres elementos de detección separados (horizontal-X, vertical-Y, axial-Z) encerrados en una sola carcasa, registrando tres mediciones con un solo sensor.
Sensores duales (V-T)		Los sensores de vibración y temperatura de salida dual son una tecnología de tres cables
Sensores para altas temperaturas		Los sensores de alta temperatura se aplican a ventiladores de aire de gases calientes, bombas de fluidos calientes, turbinas de vapor o gas, zona de secado de máquinas de fabricación de papel, etc.

Fuente: <https://evtech.cl/tipos-de-sensores-de-vibracion/>
Elaboración Propia.

- **Acelerómetros piezoeléctricos**

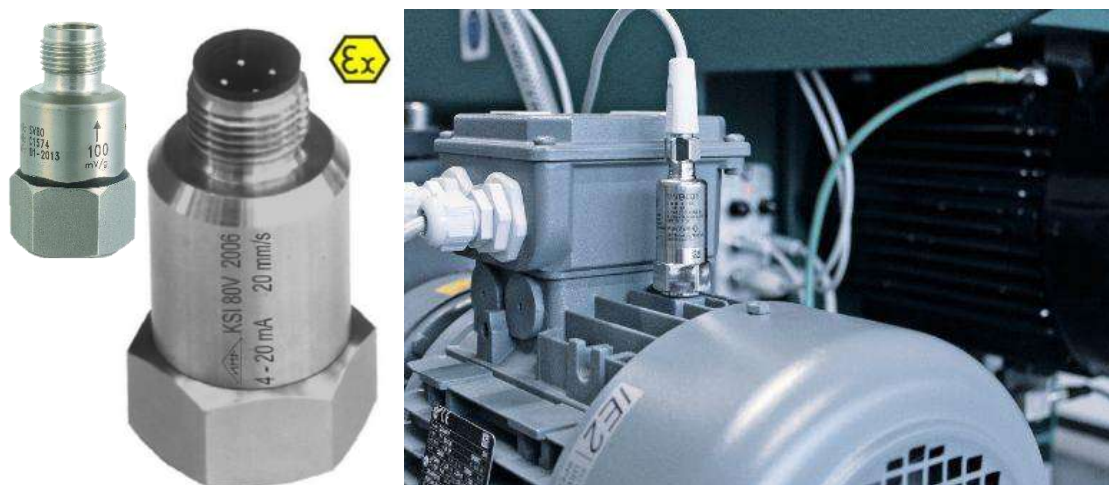
Estos sensores como su nombre lo indica basan su funcionamiento en el *efecto piezoeléctrico*²³. Los acelerómetros piezoeléctricos tienen una señal constante frente a un amplio rango de frecuencia, siendo útiles para todo tipo de mediciones de vibración, y su típica aplicación en la medición de vibraciones en máquinas. Este acelerómetro genera de forma natural una señal eléctrica, por lo tanto, no necesita una fuente de alimentación, sin embargo, existen acelerómetros de este tipo que cuentan con un circuito electrónico para amplificar la señal que estos generan, además que no cuentan con piezas móviles que se lleguen a desgastar. Al ser excitados por la

²³ Efecto piezoeléctrico - Es la base de los sensores PE, con una gran variedad de aplicaciones posibles (procesos industriales). Describe la propiedad de determinados sólidos para generar una carga eléctrica bajo tensión mecánica. La fuerza de actuación modifica la estructura microscópica del cuerpo; se crean dipolos entre los que se acumula una tensión. Uno de los materiales de PE más importantes es el cristal de cuarzo (SiO₂). es la base de los sensores PE, con una gran variedad de aplicaciones posibles: procesos industriales.

fuerza vibratoria, generan una señal eléctrica de salida directamente proporcional al valor de la aceleración de la vibración.

Elegir correctamente el acelerómetro que vamos a emplear es fundamental tener en cuenta una serie de factores, como ser la sensibilidad, el rango de frecuencias y su margen de error, la frecuencia de resonancia y la forma de montaje [30].

Figura.3.15 Acelerómetro piezoeléctrico aplicado a el motor eléctrico



Fuente: <https://www.ifm.com/mx/es/shared/productos/vyb/sensores-de-vibracion-con-io-link>

3.8.1.2 Instrumentos de Control

Los instrumentos destinados a el control de equipos o procesos, tratan de mantener mediante un sistema de control (lazo abierto o lazo cerrado), en valores próximos a los deseados a pesar de las perturbaciones que se lleguen a presentar.

3.8.1.2.1 Control manual

Dispositivos simples que conectan al motor directamente con la red eléctrica. Un control manual puede ser un simple interruptor conectado en serie con el motor, que debe ser controlado por los operadores de forma física. La protección contra sobrecargas o la desconexión por bajo voltaje pueden o no estar provistas en un controlador manual.

3.8.1.2.2 Control semiautomático

Trabaja de forma más compleja que un control manual, el cual puede tener varios botones, sensores, y estar instalado en un panel de control ubicado en un MCC (Motor Control Center); dándonos la capacidad de realizar operaciones de control de forma remota y local.

3.8.1.2.3 Control automático

Siendo dispositivos sofisticados, nos dan la facilidad de una vez establecidos los parámetros de funcionamiento de la máquina, estos controlan automáticamente el funcionamiento del motor.

3.8.2 Control de motores eléctricos de inducción

Todo motor eléctrico requiere algún tipo de mecanismo de control independientemente de su tamaño o propósito. Puede ser controlado de forma manual, semiautomática o de forma automática, según la necesidad y la aplicación requerida. En un motor de inducción podemos controlar diferentes aspectos como: arranque, paro, velocidad de funcionamiento, dirección de giro, control de par, etc., así como el control del funcionamiento, mediante el monitoreo del motor a través de los instrumentos de medición, los cuales están enlazados mediante un controlador.

Tabla 3.7 Tipos de Control de velocidad, arranque y paro.

CONTROL	TIPO	CONTROLADOR	CARACTERÍSTICA
Velocidad	Manual	-	-
	Semi automático	Sistema de engranes o poleas	Controla (reduce o incrementa) la velocidad a través de un sistema de engranajes o poleas.
	automático	VDF - Variador de frecuencia	Control de velocidad a través de la frecuencia y le voltaje de alimentación del motor.
Arranque – Paro	Manual	Directo a través de interruptor principal	Conexión directa del voltaje de alimentación a través del interruptor principal.
	Semi automático	Circuito de control con contactores	Circuito de fuerza y control para el arranque del motor a través de contactores.
	automático	Soft starter (arrancador suave) VDF – Variador de frecuencia.	Control a través de la tensión aplicado al motor, modificando el voltaje de alimentación.

Fuente: Elaboración propia.

3.9 El Mantenimiento Predictivo en la Industria

Al ya tener conocimientos previos y haber considerado las técnicas tradicionales de mantenimiento en capítulos anteriores, trataremos ampliamente el Mantenimiento Predictivo como una alternativa a la solución de problemas que se presentan en la industria.

Existen muchas definiciones del Mantenimiento Predictivo. Para algunos trabajadores, es el monitoreo de vibraciones de las maquinas rotatorias en un intento de detectar problemas iniciales y para prevenir fallas catastróficas. Para otros, es el monitoreo de imágenes infrarrojas o termografía de equipos eléctricos, motores entre otros, con la finalidad de detectar problemas que estén surgiendo. La premisa común del Mantenimiento predictivo es el monitoreo regular de la condición mecánica o eléctrica en tiempo real, la eficiencia operativa, y otros indicadores clave. Esto nos permite la evaluación de la perdida de eficiencia para cada máquina, equipo y sistema en la planta. Además, mediante la adquisición de datos, se puede calcular indicadores cruciales como el Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF – Mean Time Between Failure) [31].

El mantenimiento predictivo es una filosofía, que se fundamenta en el monitoreo continuo de la condición operativa de los equipos y sistemas de la planta, con el objetivo de optimizar el rendimiento general de la instalación.

Un programa integral de gestión de mantenimiento predictivo utiliza los métodos más rentables herramientas (por ejemplo, monitoreo de vibraciones, termografía, tribología) para obtener la condición operativa real de los sistemas críticos de la planta, y en base a estos datos reales, programar todas las actividades de mantenimiento según sea necesario [31].

3.10 Beneficios del Mantenimiento Predictivo

El mantenimiento predicativo (PdM) no es un sustituto de los demás métodos tradicionales de mantenimiento. Este es, sin embargo, una valiosa adición en el programa de mantenimiento de una planta [31].

Entre los principales beneficios del mantenimiento predictivo podemos citar:

- La anticipación a eventuales problemas con la verificación puntual de los equipos, reduciendo así las fallas en las máquinas.

- Programa tareas específicas de mantenimiento solamente cuando estas sean necesarias, reduciendo el tiempo de paradas por reparación.
- Aumento de la vida útil de las piezas, con la detección anticipada de los problemas que se pueden presentar en las maquinas reduciendo la severidad de los daños, y aumentando la vida operacional del equipo.
- Capacidad de estimar el tiempo promedio entre fallas (MTBF – Mean Time Between Failures), ayudándonos a reducirlo con la implementación de un PdM.
- Con la adquisición de datos predictivos se puede suministrar las informaciones requeridas para planificar las reparaciones específicas, y otras actividades durante la parada programada anual.

3.11 Estrategias de mantenimiento predictivo (PdM)

El mantenimiento predictivo es un conjunto de técnicas instrumentadas de medida y análisis de variables o parámetros para caracterizar los modos de fallo potenciales de los equipos [32], el cual cuenta con un sistema de procedimientos que incluye:

- Tecnología de monitoreo de condición.
- Tecnología de diagnóstico de falla.
- Predicción de estado y soporte de decisiones de mantenimiento.
- Actividades de mantenimiento.

Entre las estrategias²⁴ del PdM y con un orden correlativo para su procedimiento o implementación podemos citar cinco estrategias que las describimos en la tabla 3.8, la cuales pueden servirnos como punto de partida para comprender el enfoque que tiene el Mantenimiento Predictivo, tomando en cuenta que estas estrategias pueden ser adecuadas a la necesidad de cada equipo o industria que necesite su implementación.

²⁴ Serie de acciones muy meditadas, encaminadas hacia un fin determinado.

Tabla 3.8 Estrategias del PdM.

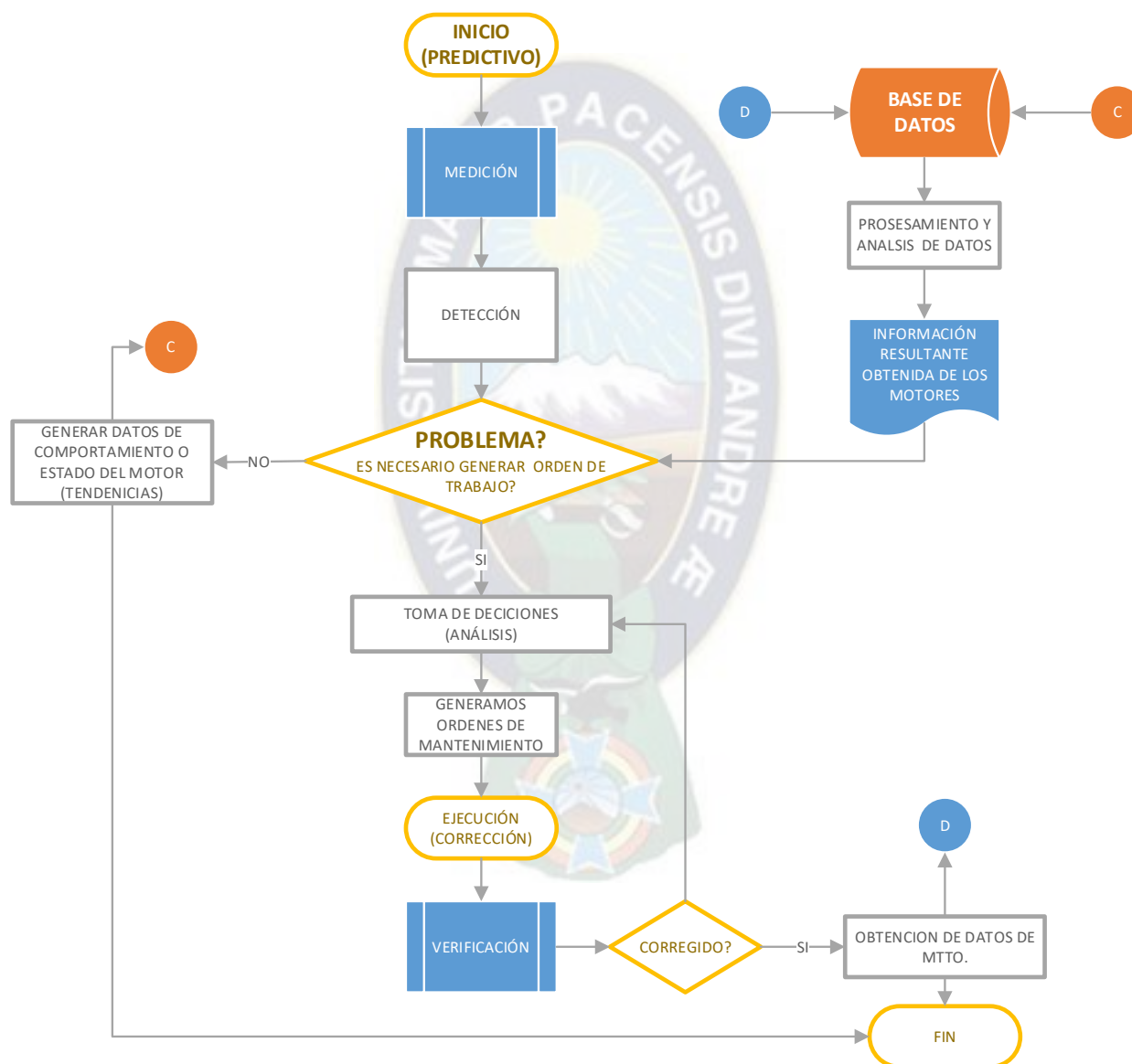
ESTRATEGIA	DEFINICIÓN
PRIMERO Monitoreo y recolección de datos	<p>El primer paso del mantenimiento predictivo (PdM) es establecer un sistema de medición y monitoreo de condición para el equipo. Se debe confirmar el método de medición, ya sea a través de instrumentos generales o de instrumentos especiales que nos permita recopilar datos relevantes. Entre los datos que pueden recopilarse se encuentran vibraciones, temperatura, entre otros parámetros²⁵. Estos parámetros son esenciales para identificar signos tempranos de problemas y tomar decisiones proactivas para prevenir posibles fallas.</p>
SEGUNDO Detección de anomalías	<p>En este paso se lleva a cabo la detección de anomalías o desviaciones en los datos durante el monitoreo. De las herramientas y técnicas de análisis como el análisis de vibraciones, análisis de termografía, análisis de espectros, entre otros, para identificar patrones inusuales o comportamientos anómalos. La detección temprana de estas irregularidades es esencial para tomar acciones preventivas y evitar posibles fallos o daños mayores en los equipos.</p>
TERCERO evaluación y análisis de probabilidad fallas	<p>Después de detectar anomalías, se realiza una evaluación y análisis detallado de los datos para determinar la gravedad de las desviaciones y su impacto en el rendimiento del equipo. El análisis también ayuda a identificar posibles causas raíz del problema, lo que contribuye en una toma de decisiones más informada en el siguiente paso. Se puede utilizar tecnología de diagnóstico de fallas, análisis de datos y recopilación de información para evaluar el comportamiento de los parámetros del motor eléctrico y prever posibles fallas futuras.</p>
CUARTO Planificación, ejecución de trabajos de mantenimiento	<p>Con base a la evaluación y el análisis, se establece un plan de mantenimiento adecuado para abordar las anomalías detectadas. Se determina el tipo de mantenimiento requerido, y se programa las intervenciones necesarias. La planificación incluye la asignación de recursos, la coordinación de actividades y el establecimiento de fechas y tiempos óptimos para llevar a cabo las acciones de mantenimiento. Posteriormente se ejecuta las correcciones necesarias.</p>
QUINTO Seguimiento y actualización	<p>Una vez realizada las intervenciones se realiza las pruebas necesarias para evaluar la efectividad de las acciones realizadas, su aprobación y puesta en marcha. Se verifica si las desviaciones detectadas han sido corregidas y si los equipos han vuelto a su funcionamiento normal. En casos contrario se ajusta el plan de mantenimiento en función de los nuevos datos y observaciones, asegurándose de una mejora continua de la estrategia predictiva y mantener un óptimo rendimiento de los equipos a lo largo del tiempo.</p>

Fuente: Elaboración Propia.

²⁵ En el contexto de los motores eléctricos, los parámetros son medidas o valores que se utilizan para caracterizar y evaluar el rendimiento, la eficiencia y el funcionamiento del motor. Estos parámetros proporcionan información importante sobre el estado y el rendimiento del motor eléctrico.

Una forma de desarrollar esta estrategia, es de acuerdo al flujograma que se muestra en la Figura 3.16, donde podemos observar los pasos a seguir para ejecutar al Mantenimiento Predictivo mediante la monitorización y el análisis de datos. Una forma más amplia de ver el Mantenimiento Predictivo se presenta en el anexo C2 de este proyecto.

Figura.3.16 Flujograma del mantenimiento predictivo



Fuente: Elaboración propia.

3.11.1 Técnicas y herramientas aplicables en el mantenimiento predictivo (PdM)

El Mantenimiento Predictivo de motores eléctricos utiliza diversas técnicas y herramientas para monitorear y predecir posibles fallas en los motores antes de que ocurran. Estas técnicas y herramientas utilizadas (ver cuadro 3.9) combinadas con software de análisis y sistemas de gestión de mantenimiento nos dan la posibilidad de interpretar los datos recopilados y generar alertas o recomendaciones de mantenimiento preventivo antes de que ocurran fallas importantes.

Tabla 3.9 Técnicas y herramientas aplicables en el PdM.

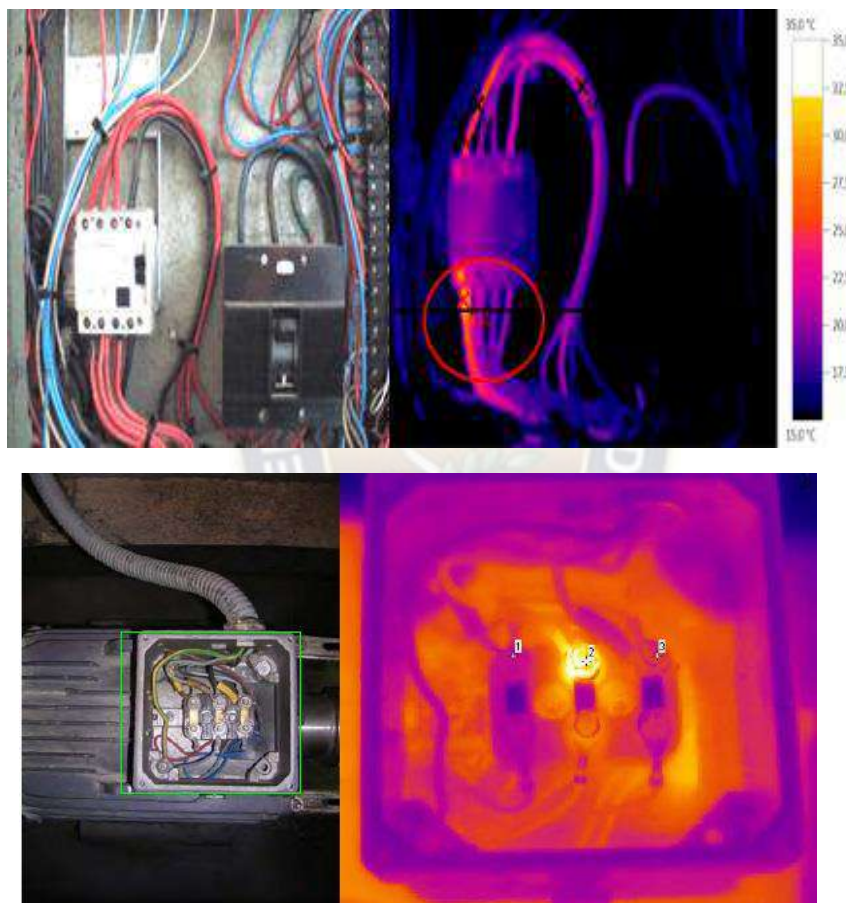
Técnica	Descripción	Equipos y herramientas utilizados
Análisis de vibraciones	Medición de las vibraciones generadas por el motor.	<ul style="list-style-type: none"> - Analizador de vibraciones: Ejemplos incluyen SKF Micrologix, Prüftechnik VibXpert, Commtest vbSeries. - Acelerómetros y sensores de vibración. - Software de análisis de vibraciones.
Análisis de corriente	Monitoreo de la corriente eléctrica consumida por el motor.	<ul style="list-style-type: none"> - Pinzas amperimétricas o sondas de corriente. - Registradores de datos de corriente. - Software de análisis de corriente.
Análisis de temperatura	Medición de la temperatura en diferentes puntos clave del motor.	<ul style="list-style-type: none"> - Termómetros de infrarrojos (pistolas láser). - Cámara Termográfica. - Sensores de temperatura (termopares, termistores, RTD). - Registradores de datos de temperatura.
Análisis de aceite	Análisis del aceite del motor en busca de partículas y productos de desgaste.	<ul style="list-style-type: none"> - Kits de muestreo de aceite. - Microscopios para análisis de partículas. - Equipos de análisis de aceite (espectrofotómetros, contadores de partículas).
Inspección visual	Inspección visual del motor en busca de signos visibles de desgaste o daños.	<ul style="list-style-type: none"> - Linternas y cámaras de inspección. - Espejos telescópicos y herramientas de inspección.
Análisis de ultrasonido	Detección de sonidos inaudibles para detectar problemas en los rodamientos o fugas.	<ul style="list-style-type: none"> - Equipos de ultrasonido portátiles (Ejemplo: UE Systems Ultraprobe, SDT Ultranalysis Suite). - Micrófonos y transductores de ultrasonido.
Monitoreo de condiciones en línea	Monitoreo continuo del rendimiento del motor en tiempo real.	<ul style="list-style-type: none"> - Sistemas de monitoreo en línea (Ejemplo: Emerson AMS, SKF Multilog, Rockwell Automation Condition Monitoring). - Sensores y transmisores de datos (vibración, corriente, temperatura, etc.). - Software de gestión de activos y análisis de datos.

Fuente: Elaboración Propia.

3.11.1.2 Termografía

La termografía es una de las técnicas más utilizadas en el PdM ya que esta tiene una aplicación muy concreta en el mantenimiento, basándose en el hecho de que todo cuerpo que presenta una temperatura superior a cero absoluto emite una radiación electromagnética.

Figura.3.17 Termografía infrarroja en equipos eléctricos.



Fuente: <https://higieneysseguridadlaboral.com/blog/termografia-infrarroja/>

Como ya es sabido uno de las variables que nos muestra características claras de la degradación funcional de un equipo cualquiera que este sea (rodamientos, conexiones eléctricas, componentes electrónicos, etc.) es la temperatura. Dicha temperatura provoca una radiación la cual es captada por los sistemas de termografía. Las leyes de Planck y Stefan Boltzmann fundamentan la teoría de la termografía.

Ley de Planck. Indica que las diferentes temperaturas que adquiere un cuerpo caliente se traducen en energía radiada en diferentes longitudes de onda. Establece que no todas las superficies emiten o absorben la misma cantidad de energía radiante cuando se calienta a la misma temperatura.

La ecuación de Planck, también conocida como la ley de Planck, describe la relación entre la energía de un fotón y la frecuencia de la radiación electromagnética. La ecuación de Planck se expresa de la siguiente manera:

Ecuación 3.1 – Ecuación de Planck

$$E = h * \nu$$

Donde:

E: es la energía del fotón [J].

h: es la constante de Planck, aproximadamente 6.626×10^{-34} [J·s]

ν : es la frecuencia de la radiación electromagnética asociada al fotón [$\frac{1}{s}$].

Ley de Estefan – Boltzmann. Establece la proporcionalidad entre la radiación emitida y la temperatura del objeto analizado [3]. Un cuerpo negro emite radiación térmica con una potencia emisiva hemisférica total (W/m^2) proporcional a la cuarta potencia de su temperatura.

Ecuación 3.2 - Ecuación de Estefan – Boltzmann

$$P = \varepsilon * \sigma * A * T^4$$

Donde:

P: potencia radiante total emitida [W].

ε : emisividad²⁶ del material.

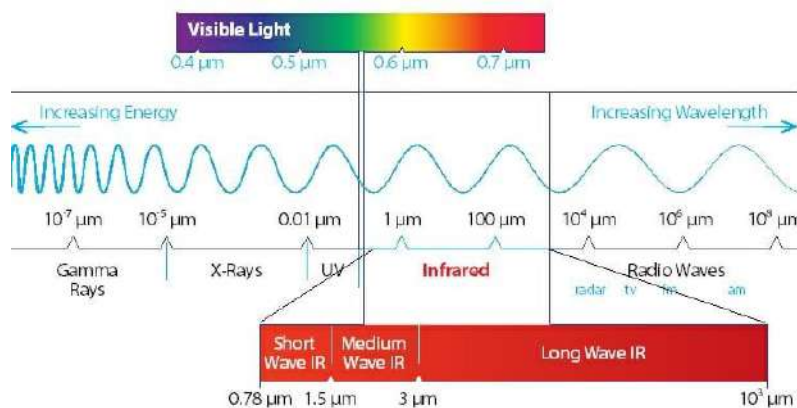
A: área de la superficie del cuerpo [m^2].

T: temperatura absoluta e la superficie [K].

*σ : constante de Boltzmann; $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$ [$\frac{W}{m^2 * K^4}$].*

²⁶ La emisividad se define como la relación entre la radiación emitida por un cuerpo real y la radiación emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura. Se expresa como un valor entre 0 y 1, donde 0 representa una reflectividad perfecta (sin emisión) y 1 representa una emisividad perfecta (emisión total). Este valor adimensional indica la eficiencia con la que un objeto emite radiación térmica en comparación con un cuerpo negro.

Figura.3.18 Radiación infrarroja en el espectro de onda



Fuente: <https://www.herschel-infrarrojo.mx/como-funcionan-los-calentadores-de-infrarrojos/tipos-de-calor-infrarrojo/>

Las cámaras termográficas, utilizadas para capturar imágenes térmicas y medir la temperatura de los objetos, generalmente operan en el rango del infrarrojo lejano (FIR). El rango de longitud de onda típico en el que trabajan las cámaras termográficas es de aproximadamente 7 a 14 micrómetros (μm), que equivale aproximadamente entre los -20 a 350 $^{\circ}\text{C}$. Es importante destacar que el rango de longitud de onda puede variar ligeramente dependiendo del modelo y las especificaciones de la cámara termográfica.

Al capturar imágenes en el rango infrarrojo de onda larga, las cámaras termográficas pueden visualizar las diferencias de temperatura en los objetos y representarlas en forma de colores o tonos, donde cada color o tono corresponde a una temperatura específica.

3.3.1.1.1 Norma de referencia para el análisis termográfico

La norma ISO 18434-1²⁷ establece una guía para el uso de la termografía infrarroja como parte del monitoreo de la condición y diagnóstico de máquinas. La Termografía Infrarroja (IRT) puede ser utilizada para identificar y documentar anomalías, las cuales son usualmente causadas por cada mecanismo en operación, inapropiada lubricación, desalineación, componentes gastados o anomalías mecánicas de carga.

²⁷Norma ISO 18434-1:2008, Monitoreo de condición y diagnóstico de máquinas – termografía, Parte 1: Procedimientos generales.

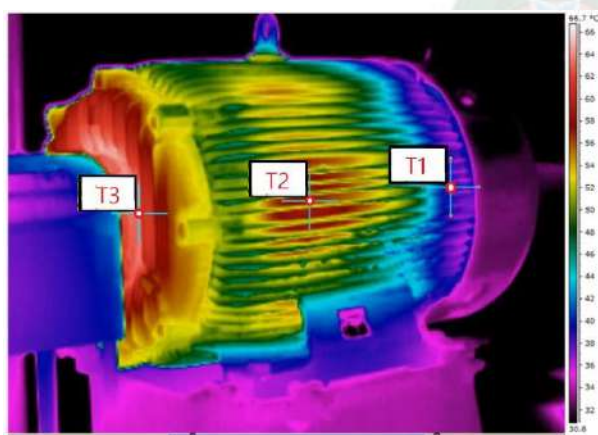
3.3.1.1.2 Selección de puntos de termografía en motores eléctrico de inducción

La selección de puntos de termografía en motores eléctricos de inducción es una parte fundamental para llevar a cabo un adecuado mantenimiento predictivo y monitorear el estado térmico de estos motores. Aspectos importantes como el consultar documentación o manuales, identificar componentes críticos, considerar zonas con mayor probabilidad de falla que se traduzca en calentamiento, son algunos de los aspectos a tomar en cuenta para la selección de estos puntos y tener información que aporte a la detección temprana de fallas.

La cantidad de puntos de medición en una tarea de termografía para un motor eléctrico puede variar según la complejidad del motor, su tamaño y su aplicación, sin embargo, como regla general se suele medir en tres puntos críticos como ser como ser: rodamientos, bobinado, conexiones eléctricas. Estos tres puntos son esenciales para obtener una información general del estado térmico del motor. Sin embargo, en motores más grandes y complejos es posible que se desee medir en más puntos o en áreas específicas.

En muchas situaciones no se tiene acceso a algunas partes del motor y la medición es superficial en la carcasa. Es por esta razón que tomamos tres puntos importantes para la llevar a cabo la medición de temperatura por termografía (ver figura 3.19) en cada motor cuyos puntos pueden reflejar un panorama general del comportamiento térmico del mismo.

Figura.3.19 Radiación infrarroja en el espectro de onda



Puntos de medición:

- T1 - Medición lado ventilador
- T2 - Medición central
- T3 – Medición lado acople

Fuente. Elaboración propia

3.11.1.3 Análisis de Vibraciones

Las vibraciones son oscilaciones las cuales causan movimiento. La vibración se puede definir como un movimiento periódico o un movimiento que se repite en un momento dado [33].

Toda máquina vibra en funcionamiento por más perfecta que esta sea. Se almacena gran cantidad de información en dicha vibración la cual puede ser útil para conocer el estado de la máquina [3]. El análisis vibracional es la capacidad de distinguir una vibración normal de una anormal; la información adquirida en un análisis de vibraciones de una máquina nos puede llevar a deducir y decidir si es necesario su intervención hacia un mantenimiento por haber pasado sus parámetros de funcionamiento normal y actuar antes de que se llegue a producir una avería o paro. El desequilibrio, la holgura mecánica y la desalineación son solo algunas fallas que el análisis de vibraciones puede ayudar a identificar. En un motor eléctrico estos pueden ser de origen mecánico o eléctrico. Estas mediciones se pueden realizar manualmente usando dispositivos portátiles, que en su mayoría requieren alguna forma de transductores para medir la vibración al convertir el movimiento mecánico en señales eléctricas.

Matemáticamente, el análisis de vibraciones se basa en el procesamiento de señales y el análisis de frecuencia. Una señal de vibración es una función que representa la amplitud de la vibración en función del tiempo. Esta señal que se encuentra en función del tiempo puede ser transformada al dominio de la frecuencia mediante la Transformada rápida de Fourier – FFT (ver anexo A1).

Ecuación 3.3 – Señal de vibración en amplitud

$$x(t) = A * \text{sen}(2\pi f t + \varphi)$$

Donde:

x(t): amplitud de la vibración en el tiempo t.

A: amplitud máxima de la vibración.

f: frecuencia de vibración.

t: tiempo

φ: es la fase de vibración.

En una vibración, el valor RMS es el más usado para realizar tendencias de vibraciones en máquinas, utilizándose típicamente los valores de velocidad [mm/s] o aceleración [gravedad - g] que se obtienen de la primera y la segunda derivada de la Ecuación 3.3, que las representamos en las siguientes ecuaciones:

Ecuación 3.4 - Velocidad instantánea de un punto en movimiento vibratorio armónico simple.

$$v(t) = \frac{dx(t)}{dt} = A\omega \cos(\omega t + \varphi)$$

Ecuación 3.5 – Aceleración instantánea de un punto en movimiento vibratorio armónico simple.

$$a(t) = \frac{d^2x(t)}{dt^2} = -A\omega^2 \text{sen}(\omega t + \varphi)$$

Un valor alto de vibración en aceleración puede asociarse a fallas en rodamientos, engranajes o por lubricación, y un valor de vibración alto en velocidad puede asociarse con fallas de desbalanceo, holgura, desalineación, fallas eléctricas, entre otros.

Figura.3.20 Valores de vibración relacionados a fallas.



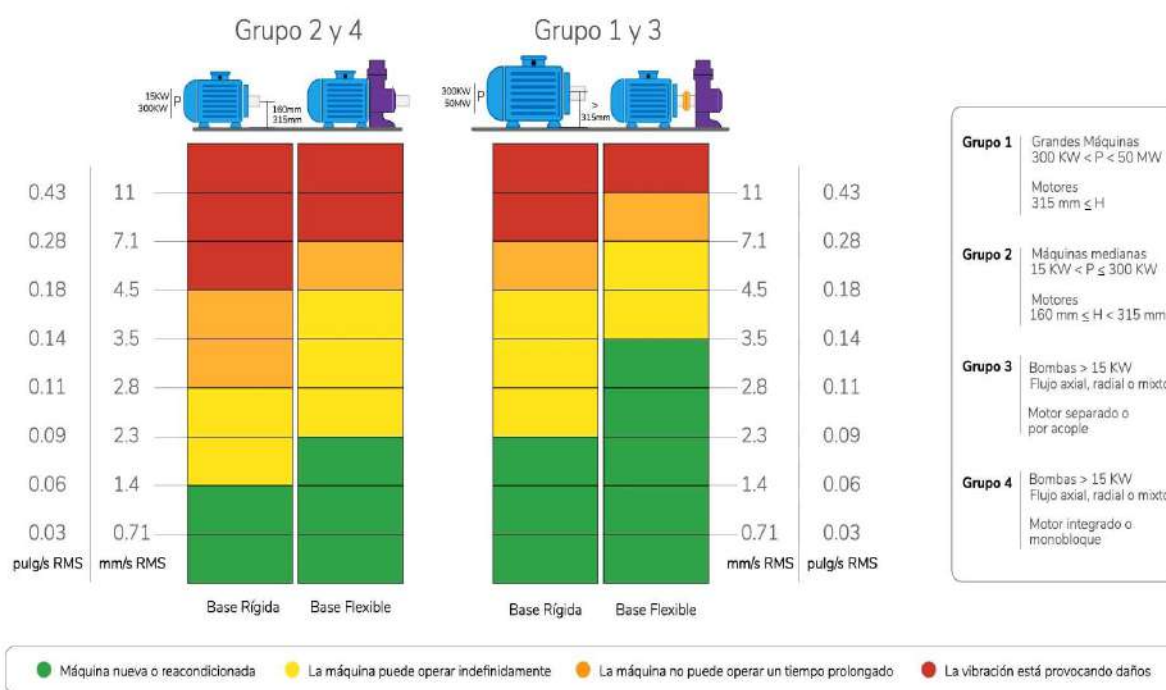
Fuente: <https://adash.com/vibration-analysis>

3.11.1.3.1 Norma de referencia para el análisis de vibraciones - ISO 10816

La ISO (Internacional Standard Organization) que cuenta con una extensa cantidad de normas referidas a la severidad de las vibraciones, de las cuales la norma ISO 10816-1²⁸ que es la guía general de la norma, la cual explica los aspectos básicos de vibraciones, estableciendo lineamientos y recomendaciones para medir y evaluar vibraciones absolutas utilizando mediciones realizadas sobre parte no rotativas de las máquinas, casi siempre en sitios cercanos a los apoyos de los ejes.

La ISO 10816-3 nos da un rango de vibraciones límites permisibles para valores globales tomados. Estos límites se definen en términos de valores de amplitud de vibración RMS (Root Mean Square) en diferentes rangos de frecuencia entre 10 – 1000 Hz.

Figura.3.21 Rango de vibraciones límites permisibles, ISO 10816-3.



Fuente: <https://adash.com/vibration-analysis>

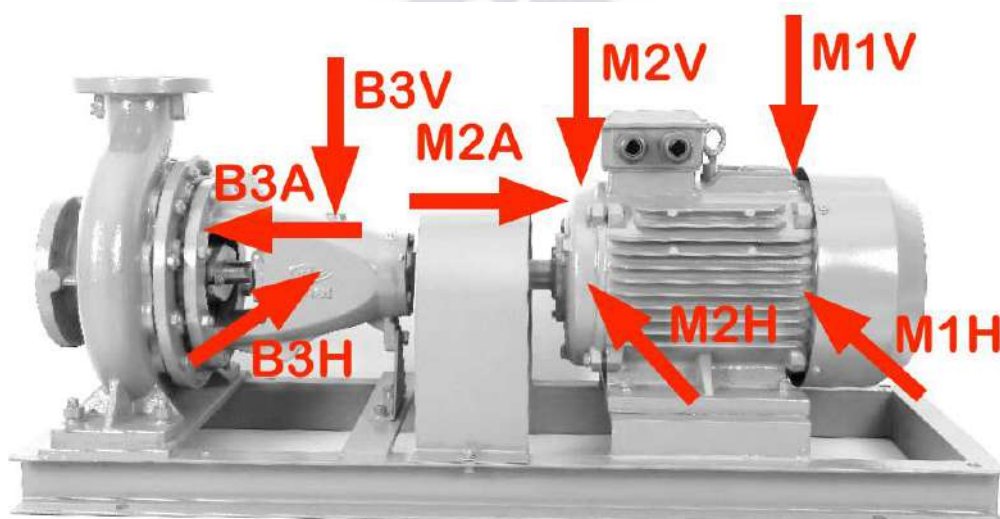
²⁸ Norma ISO 10816-1: Mechanical vibration - Evaluation of Machine Vibration by Measurements on non-rotating parts. (Robichaud y Eng, 2009)

Una herramienta que nos ayuda a interpretar las diferentes vibraciones que se pueden presentar respecto a su espectro típico es la lista ilustrada de diagnóstico de vibraciones (Anexo – A4).

3.11.1.3.2 Puntos de referencia para la toma de datos de vibraciones

Los puntos que se recomienda para la toma de vibraciones podemos referenciarla respecto a los ejes horizontal, eje vertical, y también podríamos tomar valores de vibración de forma axial al motor.

Figura.3.22 Puntos para la toma de datos de vibraciones en motores eléctricos.



Fuente: <http://www.preditecnico.com/2013/11/que-se-puede-hacer-con-un-vibrometro-en.html>

Como las vibraciones pueden ser producidas tanto desde el propio motor o desde un punto externo al motor, también es posible la toma de vibraciones en la parte que este acoplado al motor (bomba, reductor, etc.) si existiese sospechas de anomalías externas de vibración hacia el motor, cuyos valores de vibración pueden incidir en su funcionamiento.

La nomenclatura a utilizarse respecto al motor es (ver figura 3.22):

M1V: vibraciones verticales lado ventilador

M2V: vibración vertical lado acople

M1H: vibración horizontal lado ventilador

M2H: vibración horizontal lado acople

M2A: vibración axial lado acople

3.11.1.4 Pruebas estáticas

Las pruebas estáticas tienen la finalidad de verificar la integridad del sistema de aislamiento de los motores eléctricos. Estas pruebas se realizan con el motor fuera de servicio, desenergizado y sin ningún tipo de conexión, ya que en esta técnica inyectamos señales eléctricas (voltajes).

Estas pruebas se realizan en dos etapas que son:

- **Pruebas de bajo voltaje**

Esta prueba consiste en la inyección de voltajes menores o cercanos a los del voltaje nominal de placa, con la finalidad de observar si existe algún cambio en las propiedades del aislamiento del conductor eléctrico.

- **Pruebas de alto voltaje**

Esta prueba se caracteriza por poner a prueba la capacidad del conductor eléctrico con voltajes similares a la que puede presentarse en el funcionamiento normal del motor, simulando señales transitorias que se pueden presentar, verificando el comportamiento del aislamiento ante estas señales, así, ayudándonos a determinar la integridad y confiabilidad del sistema de aislamiento.

Debemos tomar en cuenta que siempre se debe realizar las pruebas de bajo voltaje, que el motor pase estas pruebas, y posterior a eso se podrá realizar las pruebas de alto voltaje.

Existe una cantidad considerable de pruebas estáticas que se pueden realizar (ver Tabla 3.10), sin embargo, en este proyecto nos centraremos en las pruebas de mayor aplicación y las que son recomendadas por estándares (Resistencia de Aislamiento, HIPOT e Índice de Polarización, prueba de impulso o SURGE TEST) que nos dan información necesaria para nuestro análisis.

De la tabla 3.10, las primeras cinco pruebas son las más utilizadas en las pruebas estáticas, que se desarrollaran en este proyecto, siendo la prueba de Impulso – Surge Test las más representativa.

Tabla 3.10 Pruebas Eléctricas Estáticas en Máquinas Rotativas

Pruebas Eléctricas Estáticas en Máquinas Rotativas	
1↓	Balaneo Resistivo del devanado (Puente Kelvin)
2↓	Resistencia de Aislamiento
3↓	Índice de Polarización / Absorción Dieléctrica
4↓	Pruebas de Alta Tensión HIPOT
5 -	Prueba de Impulso - Surge Test
6	L, C, Z, Angulo de fase (Ind., Cap., Imped.)
7	Factor de Disp. y Calidad D/Q8. RIC test (Rotor Influence Test)
8	Descargas Parciales (hasta 15 Kv)

Fuente: <https://www.comulsa.com/noticias/equipos-para-pruebas-electricas>

Tomar en cuenta que estándares sugieren la aplicación de las pruebas en el orden secuencial de la Tabla 3.10, desde prueba 1 (balanceo resistivo), acabando en la prueba de Impulso; sabiendo que cada prueba antecede al siguiente de tal manera que, en caso de no tener una respuesta favorable, no se debería continuar con la siguiente prueba.

El motor percibe voltajes de diferentes amplitudes y duración en su normal funcionamiento, lo cual hace que exista la posibilidad de un deterioro prematuro del aislamiento a causa de voltajes que pueden exceder la capacidad del conductor, acompañado de factores externos (altas temperaturas, partículas externas, humedad, etc.), los cuales ayudan a el deterioro del mismo.

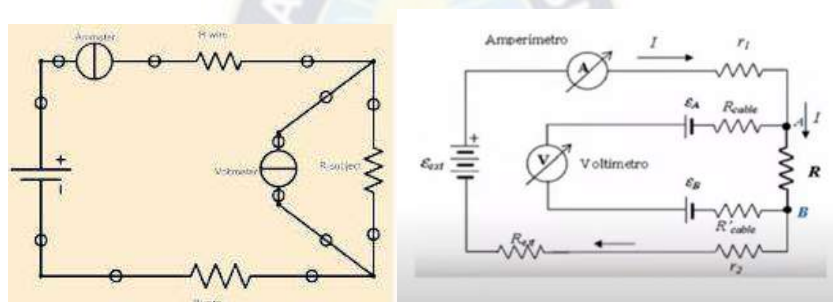
3.11.1.4.1 Prueba del Balanceo Resistivo (Puente Kelvin)

Monitorear la resistencia del motor es de vital importancia, un pequeño incremento en la resistencia puede tener un efecto significativo en el balance de resistencia de un motor eléctrico, como la aparición de calor. El desequilibrio de resistencias puede provocar un calentamiento localizado, corrientes de secuencia negativa, desbalanceo de corriente.

La resistencia en los circuitos del motor se encuentra habitualmente en el rango de los miliohmios, y en motores grandes de media y alta tensión en el rango de microhmios, por lo cual es preferible realizar la prueba con un instrumento diseñado para este fin, sin embargo, es posible realizarlo con un ohmímetro digital de baja resistencia.

La prueba de Balanceo resistivo mide y compara la resistencia de cada conductor. El siguiente tipo de conexión es el Puente Kelvin de 4 Alambres (ver Figura 3.23) que utiliza la Ley de Ohmios para determinar la resistencia, siendo el más común y utilizado por su alto grado de certeza. Su aplicación es particularmente en circuitos que presentan conductores largo y significativa pérdida de voltaje.

Figura 3.23 Puente Kelvin - Prueba de desbalanceo



Fuente: Ing. José Zambrano Zárate

La ecuación que nos permite hallar un grado de comparación respecto a valores establecidos por pruebas realizadas no está normalizada pero que nos parámetros fiables para nuestro fin es:

Ecuación 3.6

$$\%R_{desb} = \frac{R_{max} - R_{min}}{R_{prom}} * 100\%$$

Cuyo resultado podemos comparar con los rangos siguientes según el estado del motor:

Tabla 3.11 Porcentaje de Desbalanceo Resistivo

Estado del motor	Porcentaje de Desbalanceo
Nuevo	<1%
Reparado	<3%
En servicio	<5% – 10% (en algunos casos)

Fuente: Ing. José Zambrano Zárate

El estándar IEEE -118 - Test Code for Resistance Measurement, es el estándar que engloba técnicas para esta prueba y toda consideración que se debería tener en su aplicación.

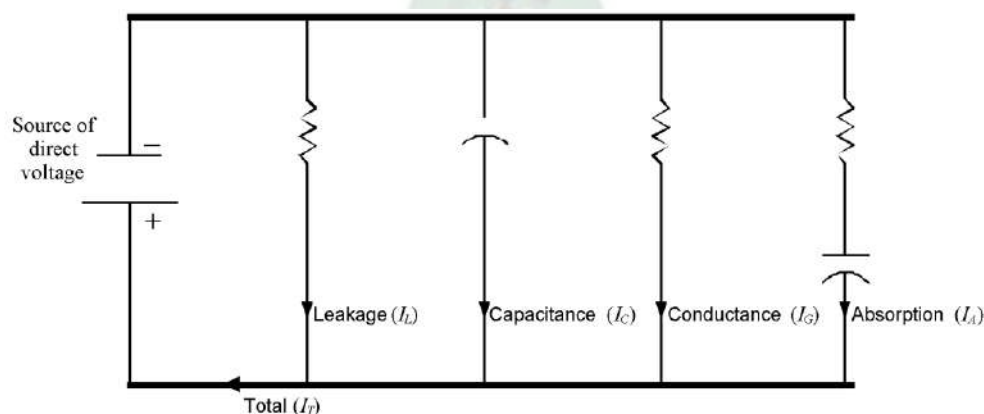
Se asume que todas las bobinas son iguales en su construcción, número de vueltas, diámetro del conductor (cobre, Aluminio), puntos calientes, etc., por lo cual al realizar la prueba se tendría que obtener valores similares, que nos da información útil para un análisis posterior. En caso de no contar valores de referencia con los cuales comparar nuestros datos, es necesario llevar un histórico de los datos adquiridos para poder tener tendencias de los datos obtenidos.

3.11.1.4.2 Prueba de Resistencia de Aislamiento

Es una prueba no destructiva que nos ayuda a conocer el estado del aislamiento eléctrico, en nuestro caso, aplicado a el motor eléctrico, actuando de forma preventiva y predictiva ante una falla que se puede presentar.

La prueba de resistencia de aislamiento es el cociente del voltaje directo aplicado a través del aislamiento, dividido por la corriente total resultante en un momento dado, donde el total de las corrientes (I_T), es la suma de las cuatro diferentes corrientes: corriente de fuga superficial (I_L), capacitancia geométrica (I_C), conductancia (I_G), y absorción (I_A) [34] (Ver figura 3.24).

Figura 3.24 Circuito equivalente mostrando las cuatro corrientes monitoreadas durante una prueba de resistencia de aislamiento.



Fuente: standard IEEE 43 - Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery. Pág. 5

La corriente de absorción (I_A) o corriente de polarización decae a un ritmo decreciente. La relación de la corriente vs. en tiempo es una función de la potencia que se muestra en la ecuación (3.7).

Ecuación 3.7 – Corriente de absorción

$$I_A = Kt^{-n}$$

Donde:

I_A : corriente de absorción

K : Es una función del sistema de aislamiento particular y del voltaje de prueba aplicado

t : tiempo de voltaje directo aplicado

n : Es una función del sistema de aislamiento particular.

El estándar IEEE 43-2000 (R2006) (Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery), hace referencia a las técnicas y métodos de pruebas para medir la resistencia de Aislamiento.

Esta prueba es la medición de la resistencia de aislamiento de bobina a tierra a voltajes similares a la nominal o dentro de un rango propuesto por la norma (ver tabla 3.12), pero en corriente continua; dándonos la posibilidad de determinar fallas a tierra o posible contaminación en la superficie. Su aplicación nos da la posibilidad de crear tendencias útiles en el mantenimiento predictivo, pero no nos brinda resultados suficientes como para asegurar que el motor puede entrar en funcionamiento.

Tabla 3.12 Voltajes de CC que se aplicarán durante la prueba de resistencia de aislamiento.

Winding rated voltage (V)^a	Insulation resistance test direct voltage (V)
<1000	500
1000–2500	500–1000
2501–5000	1000–2500
5001–12 000	2500–5000
>12 000	5000–10 000

^aRated line-to-line voltage for three-phase ac machines, line-to-ground voltage for single-phase machines, and rated direct voltage for dc machines or field windings.

Fuente: estándar IEEE 43-2000. Pag.7

Los valores encontrados luego de la prueba pueden ser comparadas con los valores de la tabla propuesta en el estándar IEEE-43 (ver tabla 3.13), que nos da los valores mínimos de resistencia (en $M\Omega$) que debería tener el motor, para saber si pasa o no la prueba realizada. Es necesario aclarar que los valores a comparar con la tabla, no son los valores medidos, sino, son los valores corregidos por temperatura; ya que las mediciones que realizamos de resistencia de aislamiento son a diferentes temperaturas, por lo cual se debe hacer una corrección de todos los valores que se hagan, ya que en el estándar los valores se encuentran a una temperatura de 40°C .

Tabla 3.13 Resistencia de Aislamiento Mínima Recomendada
Valores a 40°C (todos los valores en $M\Omega$)

Minimum insulation resistance	Test specimen
$IR_{1 \min} = kV + 1$	For most windings made before about 1970, all field windings, and others not described below
$IR_{1 \min} = 100$	For most dc armature and ac windings built after about 1970 (form-wound coils)
$IR_{1 \min} = 5$	For most machines with random-wound stator coils and form-wound coils rated below 1 kV

NOTES

1— $IR_{1 \min}$ is the recommended minimum insulation resistance, in megohms, at 40°C of the entire machine winding

2— kV is the rated machine terminal to terminal voltage, in rms kV

Fuente: estándar IEEE 43-2000. Pag.17

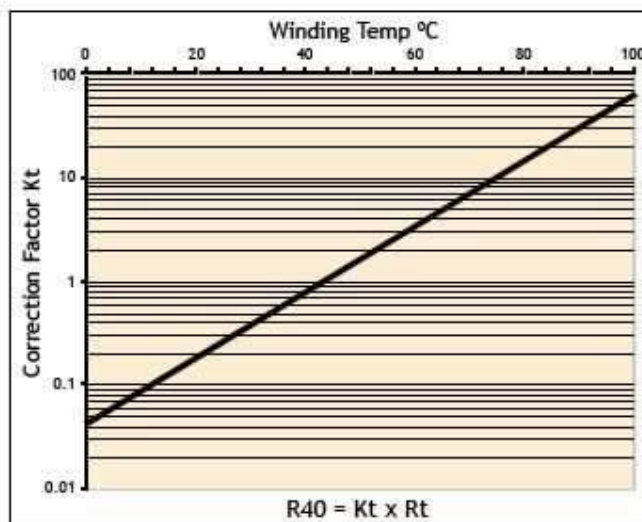
La corrección de temperatura lo podemos realizar de acuerdo a el estándar mediante el factor K_T , que nos indica que la corrección debemos realizarla dependiendo del tipo de aislamiento que tengamos en el motor al que se realiza las pruebas (termoplásticos o termoestables).

- El coeficiente K_T , para el cálculo de la resistencia de aislamiento también puede ser aproximada aplicando la ecuación:

Ecuación 3.8
$$K_T = (0.5)^{\frac{(40-T)}{10}}$$

Donde: T es temperatura del bobinado en el momento de medición [$^{\circ}\text{C}$].

Figura 3.25 Coeficiente de resistencia de aislamiento aproximado K_T , para reducir a la mitad el aislamiento para un aumento de temperatura de $10\text{ }^\circ\text{C}$



Fuente: <https://reliabilityweb.com/sp/articles/entry/prueba-de-aislamiento-de-motor-electrico-a-tierra;>
 Standard IEEE 43 - Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery.
 Pag.17

La ecuación utilizada para la corrección de la resistencia de aislamiento es:

$$\text{Ecuación 3.9} \quad R_C = K_T * R_T$$

Donde:

R_C : Resistencia de aislamiento [$M\Omega$] corregido a 40°C

K_T : Coeficiente de temperatura de la Resistencia de aislamiento temperatura $T^\circ\text{C}$

R_T : Resistencia de aislamiento medido [$M\Omega$] a temperatura $T^\circ\text{C}$.

3.11.1.4.3 Índice de Polarización y Absorción Dieléctrica

El índice de polarización y el índice de absorción son dos pruebas que al realizarlas nos dan un parámetro de cuan dañado puede estar el aislante de un bobinado.

En estas pruebas medimos la capacidad que tiene el sistema de aislamiento de polarizarse, cuya característica se pierde en caso de sufrir alguna anomalía o deterioro como ser: sistema de aislamiento agrietado, con fisura, reseco, húmedo, contaminación.

- El índice de Polarización (IP) se define como la relación entre la resistencia de aislamiento medida a 10 minutos y a 1 minuto después de aplicada una tensión continua de prueba, que debe ser constante durante la prueba o procedimiento, cuyo valor de resistencia a tierra debe crecer con el transcurso del tiempo.

Ecuación 3.10

$$IP = \frac{R_{10 \text{ min}}}{R_{1 \text{ min}}}$$

- El índice de absorción (IA) o también conocido como DAR - Dielectric Absorption Ratio, refleja el grado de contaminación interna de los bobinados.

En esta prueba, medimos la resistencia de aislamiento a tierra a los 30 segundos y al minuto.

Ecuación 3.11

$$IA = \frac{R_{1 \text{ min}}}{R_{30 \text{ seg}}}$$

Los valores hallados tanto para el Índice de Polarización (IP) y el Índice de Absorción (IA), podemos compararlas con los valores que nos proporciona la tabla 3.14, los cuales no es necesario ser corregidas para su análisis.

Tabla 3.14 Valores típicos para el Índice de Polarización y Absorción

Relación de Absorción Dieléctrica	Índice de Polarización	Clasificación del estado de Aislación
$RAD < 1,1$	$IP < 1$	Peligroso
$1,1 < RAD \leq 1,25$	$IP < 1,5$	Cuestionable
$1,25 < RAD \leq 1,4$	$1,5 \leq IP < 2$	Aceptable
$1,4 < RAD \leq 1,6$	$2 \leq IP < 3$	Bueno
$1,6 < RAD$	$3 \leq IP < 4$	Muy bueno
	$4 \leq IP$	Excelente

Fuente: TECNICAT – Índice de Polarización y Absorción, Ing. Sergio García.

La prueba de Medición de la Resistencia de Aislamiento (Megado), nos da información para realizar ya sea la prueba de Índice de Polarización o la prueba de Índice de Absorción, según el valor que este nos haya proporcionado (ver tabla 3.15).

Tabla 3.15 Elección entre Índice de Polarización y Absorción

Si la resistencia obtenida en Prueba de Resistencia de Aislamiento es:	Prueba sugerida a realizar por estándar
>5000 MΩ	IA
<5000 MΩ	IP

Standard IEEE 43 - Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery.

3.11.1.4.4 Prueba HIPOT.

Esta prueba denominada así, que proviene del inglés High Potencial (**Alta Potencia**), es una prueba que nos ayuda a verificar el estado del aislamiento en un equipo eléctrico, concretamente, la integridad del cable y su capacidad de aguantar altos voltajes, con la finalidad de contar con un aislamiento adecuado y que funcione bien dentro de un circuito.

Esta prueba no destructiva, determina la idoneidad²⁹ del aislamiento eléctrico para los transitorios de voltaje que llegan a ocurrir en su funcionamiento.

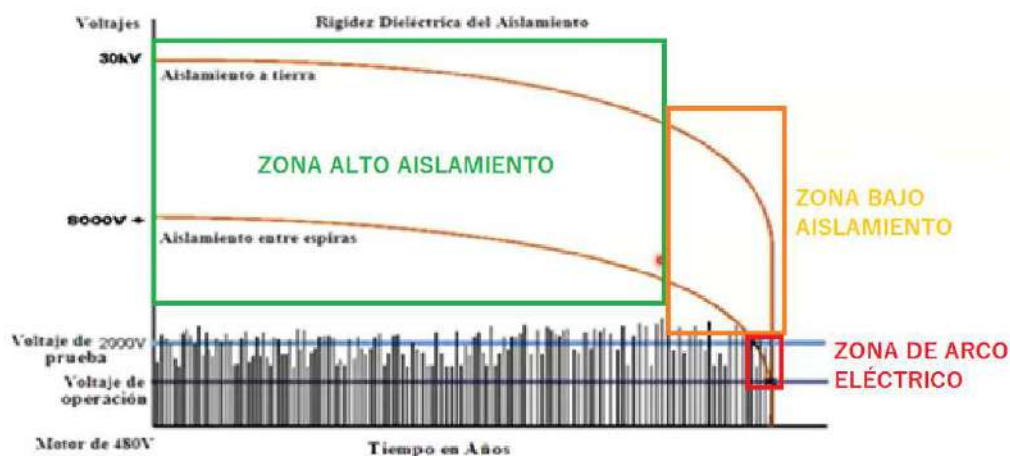
Nos ayuda a encontrar problemas como aislamientos mellados o aplastados, contaminación en conductores, distancia entre fugas, y otros. Prueba que nos ayuda a identificar el estado del aislamiento en un punto de operación del motor (ver figura 3.26).

Existen tres tipos de pruebas HIPOT en CC que llegan a ser las más comunes y utilizadas: Prueba HiPot en Escalón, prueba de HiPot en rampa, y prueba de HiPot convencional.

La prueba que mencionaremos será la Prueba de Voltaje en Escalón, porque esta es la única prueba que nos entrega información predictiva, y la menos estresante para el motor en el momento de realizarla.

²⁹ Aptitud, competencia, capacidad, suficiencia.

Figura 3.26 Rigidez dieléctrica del aislamiento (V vs. T).



Fuente: SKF Static Motor Analyzer Baker DX

• Prueba Hi-Pot en Escalón

Esta prueba consiste en la aplicación de diferentes tensiones de forma escalonada y proporcional, y con valores que recomiendan estándares como la IEEE 95³⁰, o la norma EASA AR100 -2015³¹. Esta prueba puede realizarse a los bobinas y ciertos accesorios de la maquina eléctrica - motor. En esta prueba la carcasa del motor se encuentran puestas a tierra y se aplica la tensión DC a las bobinas.

Al inyectar voltajes de forma escalonada, podemos monitorear y ver el comportamiento de las corrientes de fuga, cuya tendencia debería ser una función lineal, indicándonos el buen estado del aislamiento eléctrico (ver anexo B2).

La prueba de Alto Voltaje en Escalón (HiPot - Step Voltage), nos da la certeza de que el aislamiento a tierra soporta el trabajo normal de funcionamiento durante el arranque y paro del motor.

Según el estándar IEEE 95 y la norma ANSI/EASA AR100, la tensión máxima a aplicar está dada por la siguiente ecuación (ver Ecuación 3.12), que es la más utilizada en la mayor parte de los motores puestos a prueba.

³⁰ Estándar IEEE 95-2005, Recommended Practice for Insulation Testing of AC Electric Machinery (2300V and Above) With High Direct Voltage

³¹ ANSI/EASA AR100 -2015, Práctica Recomendada Para la Reparación de Máquinas Eléctricas Rotativas.

Ecuación 3.12

$$V_{HIPOT} = 3.4 * V_n + 1700 [V]$$

Donde:

V_{HIPOT} : Voltaje de prueba

V_n : Voltaje nominal del motor Eléctrico

La norma ANSI/EASA AR100 nos brinda tablas referidas a las tensiones que se puede aplicar en las pruebas, y que están separadas según el tipo de máquina (ver anexo B1).

Consideraciones

Entre los aspectos a tomar en cuenta al momento de realizar la prueba y post prueba podemos mencionar:

- Debe considerarse el voltaje de prueba con valores específicos a las recomendadas por el estándar y norma mencionados con anterioridad, para así evitar una falla y deterioro del aislamiento por esfuerzos excesivos no deseados y por una mala práctica.
- La prueba no puede ser repetida de forma seguida por ningún motivo, ya que esto produciría estrés eléctrico al bobinado, por consecuente, un deterioro y daño irreversible.

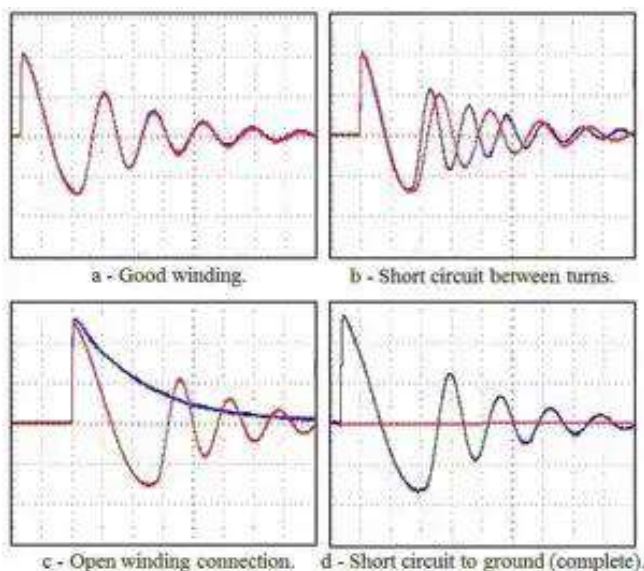
3.11.1.4.5 Prueba de Impulso - Surge Test

Esta prueba definida por la IEEE std.522, detecta daños del aislamiento entre espirar del devanado de un motor [35]. Este método implica la aplicación de alto voltaje en CC, en una serie de pasos de voltaje uniforme y a intervalos regulares de tiempo [36]. Dichos voltajes están por encima del del voltaje de operación, dándonos la posibilidad de encontrar partes débiles del aislamiento o corto circuitos.

Esta prueba nos da la posibilidad de evidenciar defectos que no son detectables con otro tipo de pruebas, como la medición de resistencia óhmica, medición de inductancia, o la prueba Hi-Pot. Estos defectos o fallas se presentan de forma típica entre espirar, entre bobinados, o entre fases.

Durante la prueba Surge, se realiza la descarga repentina de un condensador de sobretensión el cual está conectado en paralelo al bobinado que se pone a prueba, dándonos como resultado una onda senoidal amortiguadora que se crea en el circuito oscilante entre el equipo de prueba y el bobinado; estas oscilaciones tienen ciertas características que nos indican el estado del aislamiento. La figura 3.27-a, nos hace referencia a formas de onda típicas como resultado de la prueba.

Figura 3.27 – a. Formas de onda Típicas en la Prueba Surge



Fuente: <https://www.aarohies.com/why-surge-voltage-testing-is-important-for-motors/>

La onda senoidal amortiguada que se genera, relacionada con la inductancia del bobinado, la cual, al ser afectada por una falla en el aislamiento entre espiras del bobinado, produce una variación en la frecuencia (se incrementa), y por consecuencia, el periodo de la señal generada cambia. Representamos este comportamiento con las siguientes ecuaciones:

$$\text{Ecuación 3.13} \quad f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

$$\text{Ecuación 3.14} \quad T = \frac{1}{f}$$

Donde:

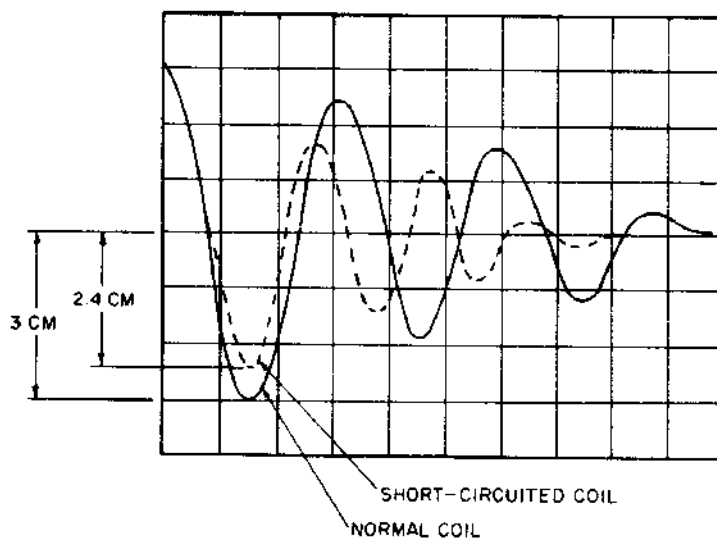
f : Frecuencia de la red [Hz]

T : Periodo [s]

L : Inductancia [H]

C : Capacitancia [μ F]

Figura 3.27 – b. Formas de onda cortocircuito en bobinado - Prueba Surge

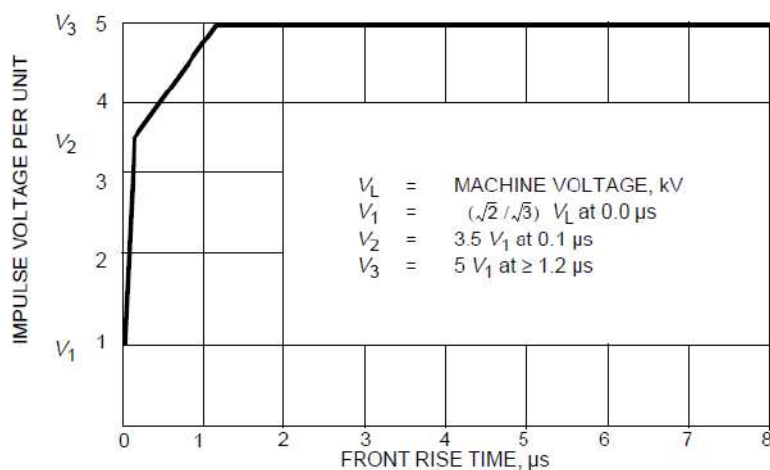


Fuente: IEEE std 522 - Guide for Testing Turn to Turn Insulation on Form-Wound Stator Coils for Alternating-Current Rotating Electric Machines

La IEEE std. 522, recomienda que se debería usar pulsos con tiempo de rizado de $0.1 \mu\text{s}$ (con una tolerancia de $-0.0 \mu\text{s}$ y $+0.1 \mu\text{s}$) cualquiera sea la técnica de prueba que se realice.

El tiempo de rizado del pulso aplicado debe estar entre 0.1 y $0.2 \mu\text{s}$ [37] (Ver figura 3.28).

Figura 3.28 Tiempo de subida del pulso aplicado - Prueba Surge



Fuente: IEEE std 522 - Guide for Testing Turn to Turn Insulation on Form-Wound Stator Coils for Alternating-Current Rotating Electric Machines

El número de espiras también puede ser visualizada en los resultados de la prueba con la interpretación de la onda resultante (ver figura 3.29).

Figura 3.29 Tiempo de subida del pulso aplicado - Prueba Surge

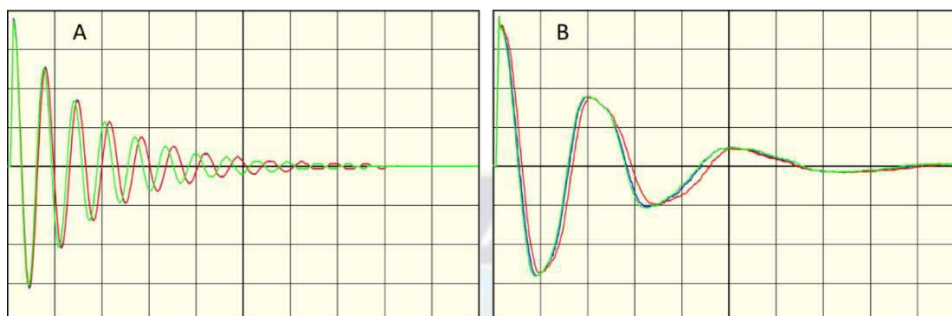


Figura 3.29: Un bobinado con pocas vueltas puede producir una forma de ondas de mayor frecuencia (A) que a bobinado con más vueltas (B). Un motor ensamblado tendrá típicamente una frecuencia de onda más baja y ser más amortiguada que solo el estator del motor.

Fuente: <https://www.pumpsandsystems.com/what-surge-comparison-testing>

3.11.1.5 Pruebas Dinámicas

Las pruebas dinámicas son pruebas que se realizan a equipos en funcionamiento con el fin de evaluar su rendimiento y comportamiento bajo diferentes condiciones operativas.

En el caso de los motores eléctricos, las pruebas dinámicas se utilizan para evaluar su funcionamiento mediante pruebas relacionadas con la firma eléctrica. Estas pruebas incluyen el análisis de corrientes, armónicos, excentricidad, entre otros. Proporcionan información valiosa sobre el estado y rendimiento del motor eléctricos, ayudándonos a tomar acciones preventivas o correctivas antes de que se produzca fallas graves.

En estas pruebas es importante considerar elementos esenciales para el óptimo funcionamiento del motor, como el sistema de alimentación CCM (Centro de Control de Motores), la carga acoplada y el propio motor. Al realizar estas pruebas dinámicas, podemos obtener información sobre el estado y funcionamiento de cada una de estas partes de estas partes.

Aunque estas pruebas no están directamente contempladas en el proyecto, es esencial considerarlas como una herramienta complementaria para el mantenimiento predictivo y la prevención de fallas.

3.12 Elementos de un sistema de monitoreo para el mantenimiento predictivo

Utilizando equipos de monitorización podemos evaluar el rendimiento de los activos. Con la instalación de sensores en las maquinas podemos evaluar la eficiencia del activo con la adquisición de datos que estos nos proporcionan, ayudándonos a contar con información del comportamiento de la máquina [38].

3.12.1 Sistemas de comunicación industriales

Definimos como *sistemas de comunicación industrial* a los mecanismos de transmisión de datos o información entre los diferentes niveles de la pirámide de automatización (ver figura 3.30), los cuales son necesarios para llevar tareas de control y gestión en un proceso [39].

La vinculación de los niveles de la pirámide de automatización se realiza por medio de distintos lenguajes de comunicación, conocido como “protocolos de comunicación”, de acuerdo a las necesidades que estos requieran (cantidad y velocidad de datos a enviar).

Esta estructura piramidal corresponde al concepto CIM (Computer Integrated Manufacturing).

Figura.3.30 Los 5 niveles de automatización



fuelle: La arquitectura de la industria 4.0

<https://repositorio.tec.mx/bitstream/handle/11285/636027/16.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Con esta organización estructural se pueden controlar y monitorear desde pequeños automatismos hasta procesos de grandes envergaduras, consiguiendo reducir los tiempos de mantenimiento y optimizar los niveles de productividad [40].

Tabla 3.16 Niveles de automatización industrial

NIVELES DE AUTOMATIZACIÓN	
NIVEL	CARACTERÍSTICAS
Nivel 0 Sensores, actuadores y mecanismos	Comprende el conjunto de dispositivos, sub procesos, maquinaria en general con la que se realiza las operaciones en la empresa. En este nivel están situados los dispositivos captadores de señal analógicas y/o digitales, captadores, sensores, transductores, Etc.
Nivel 1 Controladores	Comprende de los dispositivos lógicos de control como: autómatas programables industriales – API, tarjetas basadas en microcontroladores, microprocesador, y ordenadores especiales para el control industrial.
Nivel 2 Supervisión y control	Se realizan las tareas de adquisición y tratamiento de datos, monitorización, gestión de alarmas y asistencias, mantenimiento correctivo y preventivo, entre otros. Este nivel según la filosofía de la empresa, emite ordenes de ejecución a nivel 1 y recibe situaciones de estado de este nivel. Recibe programas de producción, calidad, mantenimiento, etc.
Nivel 3 Gestión de producción	Es el nivel de planificación, donde se realizan tareas de programación de producción, gestión de materiales, gestión de compras, análisis de costos de fabricación, control de inventarios, gestión de calidad, gestión de mantenimiento.
Nivel 4 Planificación de recursos empresariales	Recibe información consolidada sobre información de producción y proceso. Envía información relativa al cumplimiento de programas, costes de fabricación, operación, cambios de ingeniería.

Fuente: Emilio García Moreno, Automatización de procesos industriales. Elaboración propia.

3.12.2 Protocolos de comunicación

Un *protocolo de comunicación* es un sistema de reglas o condiciones que permite la comunicación entre dos o más dispositivos de un sistema de comunicación, formando una red de comunicación [41]. *Las redes de comunicación industrial* ³² ofrecen un sinfín de posibilidades gracias a las muchas variaciones que pueden presentar. Según el nivel en el que estén centradas, utilizarán un protocolo u otro y estarán configuradas de formas distintas [42].

³² Redes de comunicación. En el área industrial, nos permite conectar dispositivos entre sí, dándonos la posibilidad de pasar de un sistema aislado a uno interconectado.

Tabla 3.17 Protocolos de comunicación más utilizados en la industria

PROTOCOLOS EN REDES DE COMUNICACIÓN	
PROTOCOLO	CARACTERÍSTICAS
Modbus RTU	<ul style="list-style-type: none"> - Protocolo abierto³³ serie (RS-232 o RS-485) derivado de la arquitectura Maestro/Esclavo. - Alta disponibilidad, facilidad de uso y confiabilidad. - Solo está destinado a enviar datos y no así parámetros (resolución, unidades, etc.) - De fácil implementación respecto a otros protocolos de automatización industrial.
PROFINET	<ul style="list-style-type: none"> - Es el estándar abierto de Ethernet Industrial de la asociación PROFIBUS Internacional (PI) según IEC 61784-2 ³⁴; basado en Ethernet Industrial, TCP/IP y algunos estándares de comunicación pertenecientes al mundo TI (Tecnología de la Información). - Es un mecanismo para intercambiar datos entre controladores y dispositivos. Estos pueden ser: PLCs, DCSs o PACs. - Intercambia datos de forma rápida y determinista ³⁵.
Ethernet	<ul style="list-style-type: none"> - Ofrece alta velocidad de transmisión de datos. - Utilizado con ordenadores personales, mainframes, robots, dispositivos y adaptadores de entrada/salida (E/S), controladores lógicos programables (PLC) y otros dispositivos. - Es de fácil instalación, mantenimiento y a un bajo costo. - Admite varios tipos de topología como árbol, estrella, etc.
PROFIBUS (Process Field Bus)	<ul style="list-style-type: none"> - Es un bus de campo que permite la comunicación entre controladores, actuadores, instrumentación y sensores en entornos industriales. - Protocolo de estándar abierto. - Proporciona un mejor control que el cableado Ethernet clásico - Alta velocidad de transmisión de datos. - Los datos se transmiten en ciclos, de forma muy eficiente y rápida.
AS-i (Interfase Actuador - sensor)	<ul style="list-style-type: none"> - Definido como un bus maestro – esclavo. - Es una solución de red destinada a la industria y utilizada en sistemas de automatización basados en PLC, DCS y PC. - Desarrollada para funcionar con dispositivos sencillos ON/OFF. Esto incluye, por ejemplo, actuadores, sensores, codificadores y pulsadores en la industria manufacturera - Las principales ventajas de AS-Interface son su sencillez, su bajo coste y su alta velocidad.

Fuente: Elaboración propia.

3.12.3 Sistemas de supervisión y control

La principal función de la supervisión es proporcionarnos la posibilidad de controlar a distancia los procesos industriales (de forma remota y computarizada), centralizando el control del proceso fuera del área de control o fuera de la máquina a controlar; en la cual puede actuar tanto las personas como las máquinas [43]. De este control que puede ser realizado tanto por el hombre o la máquina podemos describir dos clases de supervisión: *la supervisión activa* o también conocida como control

³³ Protocolo abierto. Son protocolos que es tan disponibles para el público sin cargo, y cualquier proveedor puede implementar estos protocolos en su hardware o software.

³⁴ IEC 61784-2. (Communication Profile Family 3 (PROFIBUS & PROFINET) – RTE communication profiles).

³⁵ Determinismo. Afirma que todos los hechos y acciones están condicionados antes de que estos se ejecuten.

manual, donde él hombre a través de una interfaz controla los procesos y *la supervisión pasiva* o automática donde el computador o PC a través de su aplicación controla las variables del sistema y solo envía señales de alarma en caso de encontrar un error [43].

El control es realizado normalmente a través de un sistema central, el cual este compuesto por redes de comunicación industrial, bases de datos para el almacenamiento de información, e interfaces hombre - maquina HMI³⁶ (Human Machine Interface).

Con el paso de los años se ha desarrollado varios sistemas que nos permitan supervisar y controlar las distintas variables que podemos encontrar en una máquina, un proceso o una determinada planta. Entre los sistemas que podemos encontrar tenemos los sistemas SCADA y DCS.

3.12.3.1 Sistemas SCADA

SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition), es una herramienta de la automatización y control industrial. Es un sistema basado en computadores que permite supervisar, controlar y la adquisición de datos, mediante una aplicación informática.

Un sistema SCADA típico, consta de múltiples dispositivos como PLC's (programmable logic controllers) o RTU's (Remote Terminal Unit) conectados para procesar la información proveniente de los transmisores y los elementos de control final, estos dispositivos a su vez están conectados a una unidad maestra conocido como MTU³⁷ (Master Terminal Unit) en una ubicación central mediante el cual los operadores (humanos) pueden monitorear y emitir comandos [44].

Un sistema SCADA Tiene la finalidad de:

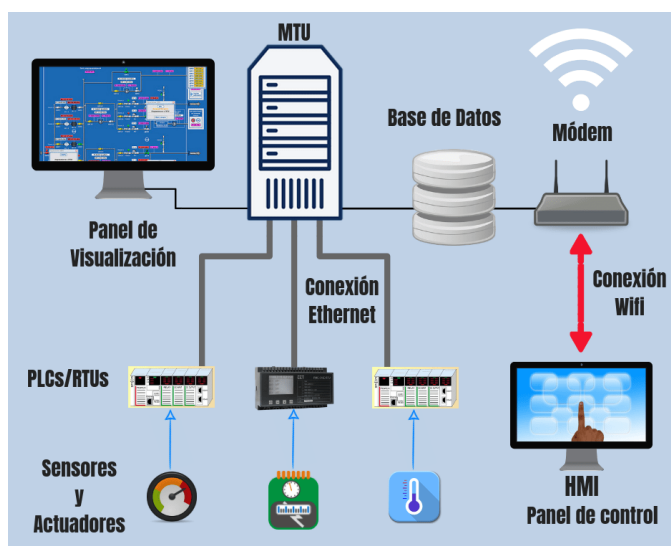
- Controlar los procesos de forma local y remota.
- Interactuar directamente con dispositivos como sensores, válvulas, motores y la interfaz HMI.
- Monitorear, recopilar y procesar datos en tiempo real.
- Crear paneles de alarma en fallas de máquinas por problemas de funcionamiento.

³⁶HMI es una interfaz de usuario o panel de control que conecta a una persona con una máquina, sistema o dispositivo. Aunque el término puede aplicarse técnicamente a cualquier pantalla que permita al usuario interactuar con un dispositivo, la HMI se utiliza más comúnmente en el contexto de los procesos industriales que controlan y monitorean máquinas de producción.

³⁷ MTU (Master Terminal Unit). Se trata del ordenador principal del sistema, el cual supervisa y recoge la información del resto de las subestaciones, ya sean otros ordenadores conectados (en sistemas complejos) a los instrumentos de campo o directamente sobre dichos instrumentos.

- Gestionar el Mantenimiento con las magnitudes obtenidas.
- El control de calidad mediante los datos recogidos.
- Grabar secuencialmente en un archivo o base de datos acontecimientos que se producen en un proceso productivo.

Figura.3.31 Diagrama básico de un sistema SCADA



Fuente: *Qué es un sistema SCADA, para qué sirve y cómo funciona*
<https://www.cursosaula21.com/que-es-un-sistema-scada/>

Los PLC y las RTU son microprocesadores que se comunican con una serie de instrumentos, tales como maquinaria de fabricación, HMI, sensores y dispositivos finales.

Los sistemas SCADA son de arquitectura abierta lo cual puede crear inseguridad, pero muchas personas lo utilizan por su mayor flexibilidad (uso de diferentes marcas y tecnologías).

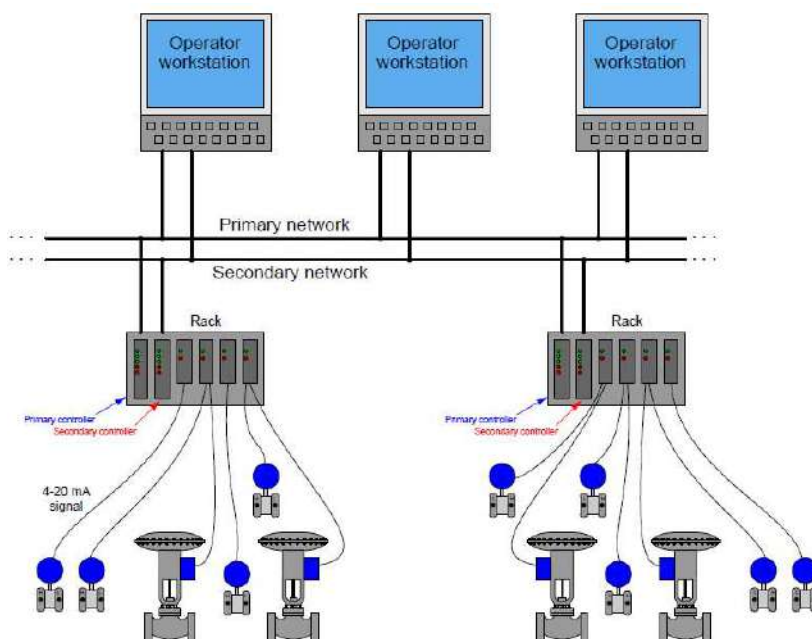
3.12.3.4 Sistema DCS

El Sistema de Control Distribuido o DCS (Distributed Control System) por sus siglas en inglés, es un sistema que puede controlar diversos procesos en paralelo, que tiene la capacidad de hacer control lógico continuo y en cantidad³⁸, y es aplicado normalmente a plantas grandes.

³⁸ manejo de un gran número de dispositivos, variables, entradas y salida (I/O) ya sean estos del tipo analógico o digital, los cuales están distribuido en toda la planta.

Los sistemas DCS trabajan con su propio controlador, su propio sistema de comunicación y su propio sistema de controladores, lo cual lo hace muy confiable y a su vez muy seguros, pero con un mayor costo para su implementación.

Figura.3.32 Arquitectura típica de un sistema DCS.



Fuente: Tony R. Kuphaldt, *Lessons Industrial Instrumentation*. Pag.2378.

Ventajas de los sistemas DCS:

- Los sistemas DCS están enfocados en el proceso.
- Se compone de controladores independientes y específicos para cada proceso.
- Tiene la ventaja de que cualquier error no afectará al conjunto de la instalación.
- Todas las capacidades básicas que se esperan de un sistema de control distribuido, a la vez que permiten el control y la optimización de toda la planta.
- *Escalabilidad*³⁹ y *arquitecturas modulares*⁴⁰ para cumplir con los requisitos exactos.
- Presentan gran redundancia en todas sus etapas lo cual implica gran fiabilidad el sistema.

³⁹ En ingeniería, es la propiedad de un sistema para poder ampliarse, sin perder calidad en los servicios ofrecidos, dándonos la capacidad hacer expansiones, cambio de tecnología, introducir nuevas funcionalidades, sustitución de aplicaciones, etc.

⁴⁰ La arquitectura modular hace referencia la división de un proceso de fabricación en varios sub sistemas, realizando una detallada evaluación de la descomposición, integración y compatibilidad de componentes.

3.13 Indicadores de Mantenimiento Aplicables en el PdM

Los indicadores de Mantenimiento son medidas cualitativas o cuantitativas que utilizamos para evaluar y monitorear el desempeño del mantenimiento de los equipos y sistemas.

La implementación de indicadores es un proceso fundamental que implica adquirir datos o mediciones de una situación actual y compararlos con un punto de referencia establecido, que puede ser un dato previamente establecido, registrado, o un objetivo a alcanzar. Para este fin, se podrá utilizar indicadores asociados a las características de los equipos, tiempo de funcionamiento, número de problemas o fallas, tiempo de inactividad, etc. Es importante recordar lo que: *“lo que no se mide no se puede analizar, gestionar, ni mejorar”*. Por lo tanto, la implementación de KPIs nos brinda una base sólida para evaluar el desempeño, identificar áreas de mejora y tomar acciones efectivas.

Estos indicadores nos proporcionan información sobre la eficiencia, confiabilidad y disponibilidad de los activos, lo que permite a los equipos de mantenimiento tomar decisiones informadas.

Alguno de los Indicadores Claves de Desempeño (KPIs) utilizados en el mantenimiento industrial de motores eléctricos los detallamos en el siguiente cuadro (Cuadro 3.18), de los cuales utilizaremos los más representativos en este proyecto y se verán más adelante.

Tabla 3.18 Indicadores claves de desempeño (KPIs)

Indicador	Características
Índice de criticidad	Clasifica el nivel de importancia de los motores en función de su impacto en el proceso de producción.
Tiempo medio entre fallos (MTBF)	Mide el promedio de tiempo entre cada falla del motor.
Tiempo medio para reparar (MTTR)	Representa el promedio de tiempo necesario para reparar el motor después de una falla.
Porcentaje de tiempo de actividad (uptime)	Mide el tiempo en que el motor está en funcionamiento y disponible para su uso.
Índice de confiabilidad	Mide la probabilidad de que el motor funcione sin fallas durante un período de tiempo específico.
Índice de mantenibilidad	Representa la facilidad y rapidez con la que se puede realizar el mantenimiento del motor.
Índice de disponibilidad	Indica la proporción del tiempo en que el motor está disponible para su uso.
Índice de vibración	Evalúa las vibraciones del motor como indicador de su estado y funcionamiento.
Índice de temperatura	Monitoriza la temperatura del motor para detectar posibles problemas de sobrecalentamiento.

Fuente: Elaboración propia.

3.13.1 Análisis de criticidad – Índice de Criticidad

Toda planta, industria, fabrica, etc., presenta un gran número de activos, pero no todos presentan la misma importancia para el funcionamiento de la misma ya que algunos pueden provocar un paro completo de la planta si se llegan a detener (fallar), mientras que otros pueden parar sin producir un efecto negativo considerable que afecte a la planta. El análisis de criticidad es una metodología que nos permite medir cuan critico puede ser un activo en el funcionamiento de una planta; se basa principalmente en factores como: no todos los activos son igual de importantes, recursos limitados⁴¹, y el tipo de mantenimiento que puede requerir un activo, ya que un mismo activo puede contar con varias tareas de mantenimiento. Lo cual hace que sea importante realizar un análisis de criticidad ya que nos ayuda en la toma de decisiones, y a discriminar que cosa es más importante que otra.

Figura 3.33 Etapa de aplicación del análisis de criticidad



Fuente: Elaboración propia

3.13.2 Indicadores – MTTR y MTBF

El MTTR y el MTBF, son los principales indicadores de disponibilidad de un equipo.

El **MTTR**, del inglés, Mean Time To Repair – Tiempo Medio para la Reparación, que es un indicador que nos indica el tiempo promedio que nos lleva en reparar un equipo. el MTTR es un indicador de la eficacia de la reparación. El tiempo total de mantenimiento de un equipo comienza cuando ocurre el incidente y termina cuando el activo vuelve a su función normal.

⁴¹ Haciendo referencia a que, si el activo es de un alto costo, muchas veces se hace imposible contar con un respaldo, que se encuentre disponible en caso de falla del activo principal.

Ecuación 3.15

$$MTTR = \frac{\text{Tiempo total de mantenimiento correctivo}}{\text{Número de operaciones de reparación}}$$

Tiempo total de mantenimiento correctivo: tiempo total dedicado a la reparación del activo.

Número de operaciones de reparación: Reparaciones que se realizó.

El **MTBF**, del inglés, Mean Time Between Failures – Tiempo Medio Entre Fallas, es un indicador que nos permite conocer el tiempo promedio en que un equipo llega a fallar luego de su última intervención (tiempo que transcurre entre dos averías). Cuanto más alto sea el valor del MTBF, más *fiable* es el funcionamiento de este equipo.

Ecuación 3.16

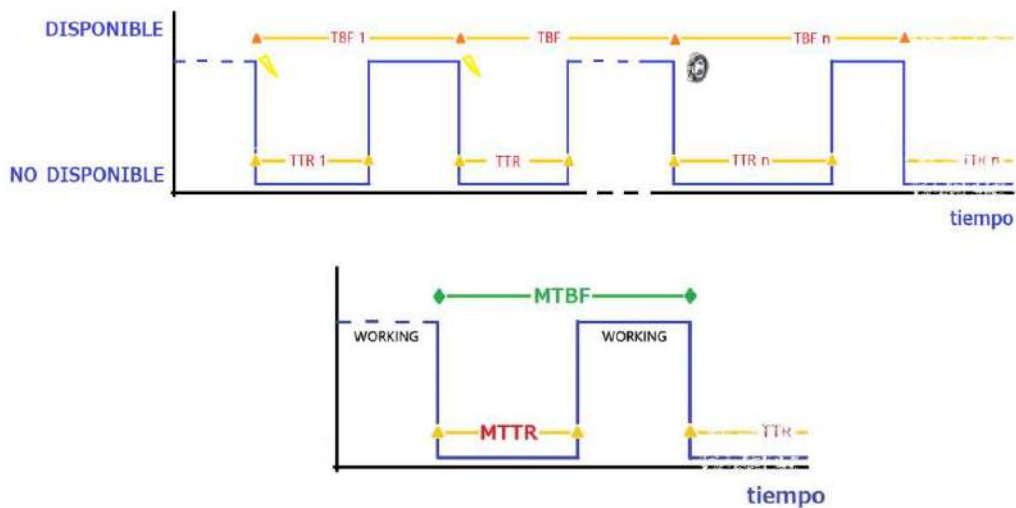
$$MTBF = \frac{\text{Tiempo total disponible} - \text{Tiempo de inactividad} \text{ [horas]}}{\text{Número de paradas}}$$

Tiempo disponible: total de horas en las que la máquina podría haber estado operando.

Tiempo de inactividad: número de horas en las que estuvo parada la máquina.

número de paradas: corresponde al número de averías o fallas.

Figura 3.34 MTBF y MTTR



Fuente: Elaboración propia

3.14 El PdM y el análisis del origen de la degeneración hacia posibles fallas.

Con el objetivo de ejecutar las tareas de mantenimiento en el momento óptimo, se busca implementar el Mantenimiento Predictivo o también conocido como *Control Predictivo de Mantenimiento*. El propósito de esta técnica es identificar el momento exacto o el “punto predictivo” en el cual la probabilidad de falla del equipo alcanza valores no deseados, lo que indica la necesidad de realizar una intervención [24]. Gracias a este enfoque, se evita intervenir el equipo prematuramente, cuando aún está en condiciones de operar adecuadamente, así como también se evita esperar hasta que sus características operativas se vean comprometidas.

La determinación de este “Punto Predictivo” se puede lograr mediante el análisis de las características operativas del equipo, utilizando tanto el *Análisis de Síntomas como el Análisis Estadísticos* [24].

Es fundamental considerar que todos los equipos tienen un ciclo de vida, y es necesario evaluar en que etapa de dicho ciclo se encuentra y, que tipos de fallas pueden presentarse.

Dependiendo de la situación en que se encuentre el equipo, se pueden identificar tres estándares de falla: *la Fase de falla temprana, la Fase de vida útil normal, y la Fase de desgaste y falla final*. La composición de estas fases, el resultado de las fases de la vida de una instalación, equipo o pieza, conocido como “Curva de la Bañera” o “Curva del ciclo de vida” [24].

Figura 3.35 Curva del Ciclo de Vida y Tasa de Tallas.



Fuente: <https://www.fractal.com/es/que-es-la-curva-de-la-banera>.

Para el análisis de degeneración de un motor eléctrico y direccionarnos a un PdM realizar los siguientes análisis (cuadro 3.19) que nos dan la posibilidad de tener información que nos ayudara a saber el estado en el que se encuentra un equipo.

Tabla 3.19 Análisis de degeneración de Motores Eléctricos

	Tareas		Acción a realizar	Objetivo
1	Recopilación de datos	Obtén datos históricos y de rendimiento de los motores eléctricos	<ul style="list-style-type: none"> - registros de mantenimiento. - fechas de instalación. - condiciones de operación. - información relevante sobre fallas anteriores. 	Contar con una base de datos con el que podamos realizar un análisis para la toma de decisiones.
2	Inspección visual	Inspecciones visuales periódicas del motor	Buscar signos de corrosión o daños en los componentes del motor, como rotores, bobinas, rodamientos y conexiones eléctricas.	Identificar signos visibles de desgaste
3	Monitoreo de condiciones	Implementa sistemas de monitoreo de condiciones para medir parámetros	Medición de vibración, temperatura, corriente, voltaje y consumo de energía.	Estos sistemas pueden ayudar a detectar cambios anormales en el rendimiento del motor y proporcionar indicadores tempranos de posibles problemas de degeneración.
4	Análisis de vibraciones	Utiliza análisis de vibraciones para identificar vibraciones anormales o patrones de vibración	Medición de desequilibrios, desalineaciones o desgaste	Nos indica posibles fallas en los componentes mecánicos del motor.
5	Análisis termográfico	Utiliza cámaras termográficas para realizar análisis termográficos	Detectar puntos calientes en el motor.	Esto puede indicar problemas como conexiones defectuosas, desequilibrios de carga o sobrecalentamiento de componentes
6	Análisis de aceite	Si el motor tiene sistemas de lubricación, realizar el análisis	Realiza análisis periódicos del aceite para detectar presencia de partículas metálicas	Obtener datos de presencia de partículas, humedad u otros indicadores de desgaste y degradación.
7	Análisis del espectro de corriente	Realiza análisis del espectro de corriente	Ver la forma de onda de la corriente eléctrica	Análisis que nos puede indicar problemas en los devanados del motor.
8	Pruebas de aislamiento	Realiza pruebas de aislamiento	para evaluar la resistencia del aislamiento del motor	Estas pruebas pueden ayudar a detectar problemas de deterioro o humedad que puedan comprometer la integridad eléctrica del motor.
9	Comparación con valores de referencia	Comparar los datos	Compara los datos recopilados con los valores de referencia y límites aceptables establecidos por el fabricante del motor o normas industriales	Esto nos permitirá identificar desviaciones significativas y determinar si se requiere alguna acción correctiva.

Fuente: Elaboración propia.

Capítulo 4 – APLICACIÓN DEL PdM A MOTORES ELÉCTRICOS DE INDUCCIÓN

La aplicación del mantenimiento predictivo en este proyecto consistirá en una guía conceptual y metodológica para su aplicación, y el análisis de datos obtenidos de un grupo de motores eléctricos.

4.1 Metodología para la implementación del PdM

La metodología que se propone se basa en todos los aspectos técnicos y teóricos anteriormente vistos, dándole un orden cronológico en su aplicación (ver Tabla 4.1).

Tabla 4.1 Metodología de Análisis Predictivo de Motores Eléctricos

Paso	Actividad	Objetivo
1	Evaluación de la importancia y criticidad de los motores	<ul style="list-style-type: none"> - Evaluar la importancia y criticidad de los motores eléctricos dentro del sistema o proceso en términos de su impacto en la producción, operación o seguridad. - Considerar el historial de fallas, disponibilidad de datos, accesibilidad y recursos disponibles para seleccionar los motores iniciales.
2	Evaluación y selección de técnicas de Mtto. y monitoreo	<ul style="list-style-type: none"> - Evaluar diferentes técnicas de monitoreo disponibles, como análisis de vibraciones, análisis de corriente, termografía, pruebas estáticas, entre otros. - Determinar qué técnicas son más adecuadas para los motores eléctricos de inducción y los objetivos del mantenimiento predictivo.
3	Definición de parámetros y criterios de monitoreo	<ul style="list-style-type: none"> - Identificar los parámetros clave a medir y monitorear en los motores eléctricos, como vibraciones, temperaturas, entre otros. - Establecer límites o criterios para determinar qué niveles son considerados normales y cuáles indican un posible problema.
4	Recopilación de datos y seguimiento regular	<ul style="list-style-type: none"> - Establecer una rutina de recopilación de datos, ya sea de forma manual o automatizada, según la frecuencia requerida por las técnicas de monitoreo utilizadas, criticidad e importancia. - El seguimiento debe ser periódico y sistemáticos para capturar la información relevante y realizar comparaciones con los valores de referencia establecidos.
5	Análisis de datos y detección de anomalías	<ul style="list-style-type: none"> - Utilizar herramientas y técnicas de análisis de datos para identificar patrones, tendencias y posibles anomalías en los datos recopilados. - Comparar las mediciones con los límites establecidos y buscar desviaciones significativas que puedan indicar problemas inminentes.
6	Acciones correctivas y preventivas	<ul style="list-style-type: none"> - Tomar acciones correctivas y preventivas basadas en los resultados del análisis de datos. - Realizar reparaciones o reemplazos de componentes, ajustes en el sistema, optimización de la lubricación, entre otras medidas.
7	Registro y documentación	<ul style="list-style-type: none"> - Mantener un registro detallado de todas las mediciones, análisis, acciones tomadas y resultados obtenidos. - Documentar las observaciones relevantes y los cambios realizados en los motores eléctricos.
8	Evaluación continua y mejora	<ul style="list-style-type: none"> - Revisar y evaluar para una mejora continua.
9	Retroalimentación de información	<ul style="list-style-type: none"> - con toda la información obtenida (registro y documentación), mejoramos nuestro sistema de monitoreo predictivo para obtener mejores resultados.

Fuente: Elaboración propia.

4.2 Aplicación del análisis de Criticidad

Realizamos el Análisis de criticidad con el uso del inventario de activos con el que cuenta o debería contar una planta, fabrica o empresa. Debemos tener en cuenta que la planta puede llegar a tener una gran cantidad de equipos, los cuales realizan diferentes tareas, y pertenecen a diferentes áreas del proceso; por lo cual debemos establecer el *alcance del análisis de criticidad* que se realizara, y a qué nivel se intenta aplicar dicho análisis en la planta (área, línea, sistema, departamento).

Con este fin, nos proponemos como alcance un sistema de molienda de cemento (Planta Cementera), teniendo como elementos principales a los motores que intervienen en su funcionamiento.

Utilizamos un modelo de criticidad con la finalidad de generar una lista de prioridades en función a la importancia que le vamos a dar a los equipos eléctricos (motores), obteniendo un orden de importancia.

Designamos la criticidad de los motores con el criterio o método basado en *Riesgo* (ver tabla 4.2), que es el más recomendable además que se alinea con la ISO 30001 – Gestión de Riesgo y la ISO55001 e ISO 55002 – Gestión de Activos, tomando aspectos como: Seguridad, Medioambiente, Producción, Costos (operación y mantenimiento), Frecuencia de fallas (MTBF), tiempo promedio de reparación (MTTR).

El cálculo de Riesgo para cada activo que consideramos, está basado en la ecuación:

$$\text{Ecuación 4.1} \quad R = F \times C$$

R: Risk factor (Factor de Riesgo)

F: Frequency (Frecuencia de falla)

C: Consequence (consecuencia)

Hallamos la Consecuencia con la siguiente formula:

$$\text{Ecuación 4.2} \quad C = (OI \times OF) + MC + ISE$$

Donde:

OI: Operational Impact factor - (Factor de impacto en operación)

OF: Operational Flexibility factor - (Factor de Flexibilidad en operación)

MC: Maintenance Cost factor - (Factor Costo de mantenimiento)

ISE: Impact on Safety and Environment factor - (Impacto en la seguridad y medio ambiente)

La siguiente tabla muestra la valoración que se da para el análisis de Criticidad en Función del Riesgo de cada uno de los activos.

Tabla 4.2 Análisis de Criticidad de Equipos por Riesgo

CLASIFICACION POR FRECUENCIA (F)

Frecuencia de Falla (F)	Fallas por periodo establecido	Valor de modelo
Pobre	>4	4
medio	3--4	3
Buena	1--2	2
Excelente	<1	1

CLASIFICACION POR FACTOR DE IMPACTO OPERACIONAL

Impacto Operacional (IO)	Consecuencias	Escala del Modelo
extremadamente Alta	Paro inmediato de la planta / area	10
Muy Alta	paro parcial de la planta / area	6
Alta	Impacto en los niveles de la producción o calidad	4
Medio	Costos de operación asociados con la indisponibilidad	2
Baja	Sin impacto significativo en operación	1

FACTOR DE FLEXIBILIDAD OPERACIONAL

Flexibilidad Operacional (FO)	Consecuencia	Escala del Modelo
Alto	Sin repuestos para alternativa de operación	4
Medio	Función envío de repuesto	2
Bajo	Función de repuesto disponible	1

COSTOS DE MANTENIMIENTO

Costos de Mantenimiento (MC)	Consecuencia	Escala del Modelo
Alta	>= 10 000 Sus	2
Baja	< 10 000 Sus	1

IMPACTO EN LA SEGURIDAD Y MEDIO AMBIENTE

Impacto en la Seguridad y Medio Ambiente (ISE)	Consecuencias	Escala del Modelo
Extremadamente Alto	Impacto en la seguridad humana con requerimiento de notificación a institución pública	8
Muy Alto	Afección irreverdible al medio Ambiente	6
Alto	Impacto en la operación de las instalaciones causando daños severos.	4
Medio	posibles Accidentes e Incidentes en operación	2
Bajo	Afección al medioambiente sin la violación de leyes medioambientales, impacto en la operación	1
Muy bajo	Sin impacto humano, al medio Ambiente u operación de las instalaciones.	0

Tabla 4.3 Niveles de criticidad

NIVELES DE CRITICIDAD DE ACTIVOS	
Nivel de Criticidad de Activos	Valores Adimensionales de Riesgo
Critico	$R > 100$
Semi-critico	$40 < R < 100$
No-critico	$R < 40$

Fuente: *The Maintenance Management Framework - Models and Methods for Complex Systems Maintenance*

La matriz de expuesta en la siguiente figura es la que nos da la categoría del nivel de criticidad de cada activo, después del cálculo realizado con las ecuaciones 4.1 y 4.2

Figura 4.1 Matriz de Criticidad por Análisis de Riesgo

Matriz de Criticidad por analisis de Riesgo						
FRECUENCIA	4	NC	SC	C	C	C
	3	NC	SC	SC	C	C
	2	NC	NC	SC	SC	C
	1	NC	NC	NC	NC	SC
		10	20	30	40	50
		CONSECUENCIA				

Fuente: *The Maintenance Management Framework - Models and Methods for Complex Systems Maintenance*.

Los datos necesarios para el cálculo de Criticidad se dan en función de las características de operación y funcionamiento de cada activo, así como el criterio del papel que desempeña en el sistema de Molienda de Cemento que es nuestro caso de aplicación.

Cálculo de Criticidad para motores eléctricos de área de molino de cemento

El cálculo de la criticidad para los motores se elabora de acuerdo al criterio adoptado y expuesto anteriormente en la tabla 4.2. Los cálculos se los realiza mediante un programa elaborado en función de las características y parámetros que se estableció de cada equipo, donde se introduce la información necesaria para cada equipo, obteniendo los resultados del nivel de criticidad que representa cada equipo, en nuestro estudio damos énfasis a los motores eléctricos de esta área.

Ejemplo de cálculo para MOTOR PRINCIPAL 531.MD140

El Motor Principal 531.MD140, es una de las maquina eléctricas más representativas y principales el Área de Molienda de Cemento, por lo cual se tomará como ejemplo de cálculo que se realiza para todos los equipos de dicha Área.

Datos de partida:

Tiempo de funcionamiento Área de Molienda de Cemento

	MESES (*)	HORAS - DIA	TOTAL HORAS
FUNCIONAMIENTO	6	24	4320.00
	VALORES MODIFICABLES		

(*) MESES DE FUNCIONAMIENTO PROGRAMADO ANTES DE UN OVER HALL

Datos técnicos de Motor Desde Base de Datos

A	B	C	D	E	F
ITEM	Campo clasif. (Cod Ant)	Equipo	Denominación	Marca	Ubicacion tecnica
129	531.MD140.M01	10008809	MOTOR PRINCIPAL MD140	10008623	BO04-5800C-600-05-622
130	531.MD140.Y01	10009291	ARRANCADOR DE REOSTATO 531MD140	10008623	BO04-5800C-600-05-622
131	531.MD140.I01	10009292	INSTRUMENTACIÓN 531MD140	10008623	BO04-5800C-600-05-622

Datos insertados para cálculo de Criticidad – de tabla 4.2

M	N	O	P	Q
F (Frecuencia)	OI (Operational Impact)	OF (Operational Flexibility)	MC (Maintenance Cost)	ISE (Impact on Safety and Enviromet)
3	10	4	2	4
2	10	4	1	2
2	2	2	1	0

Resultados Obtenidos de Criticidad para Motor MD140

ITEM	Campo clasif. (Cod Ant)	Equipo	Denominación	F (Frecuencia)	C (Consecuencia)	Criticidad FxC
129	531.MD140.M01	10008809	MOTOR PRINCIPAL MD140	3	46	138
130	531.MD140.Y01	10009291	ARRANCADOR DE REOSTATO 531MD140	2	43	86
131	531.MD140.I01	10009292	INSTRUMENTACIÓN 531MD140	2	5	10

Con el mismo análisis obtenemos resultados para todos los equipos que conforman el Área de Molienda de Cemento, obteniendo los siguientes resultados.

Resultados de criticidad obtenidos:

Tabla 4.4 Datos obtenidos de la Criticidad de los equipos

DATOS	CRITICIDAD
MÁXIMO	144
MÍNIMO	4
MEDIA	29.6

Tabla 4.5 Valores globales de Criticidad

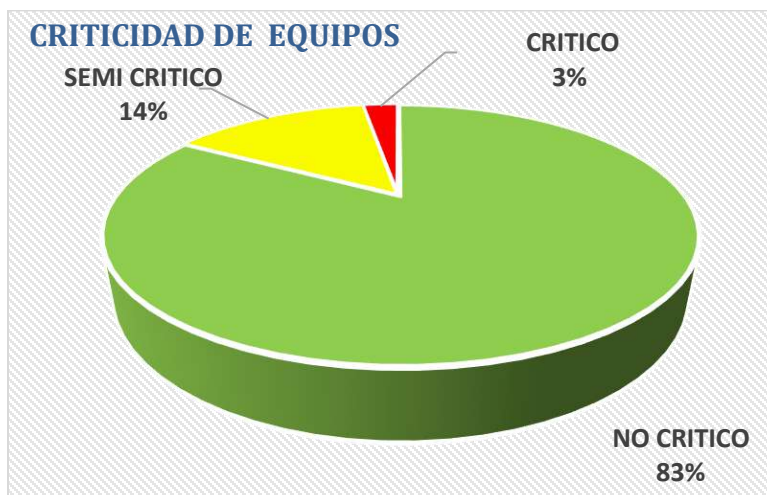
CRITICIDAD	NRO. EQUIPOS
NO CRITICO	264
SEMI CRITICO	45
CRITICO	8
TOTAL, EQUIPOS	317

Fuente. Elaboración propia

Cabe mencionar que estos resultados representan al total de equipos que pertenecen a esta área.

Des estos datos podemos obtener un gráfico que nos muestra la cantidad porcentual de equipos que están asociados a los niveles de criticidad representado en el gráfico 4.1.

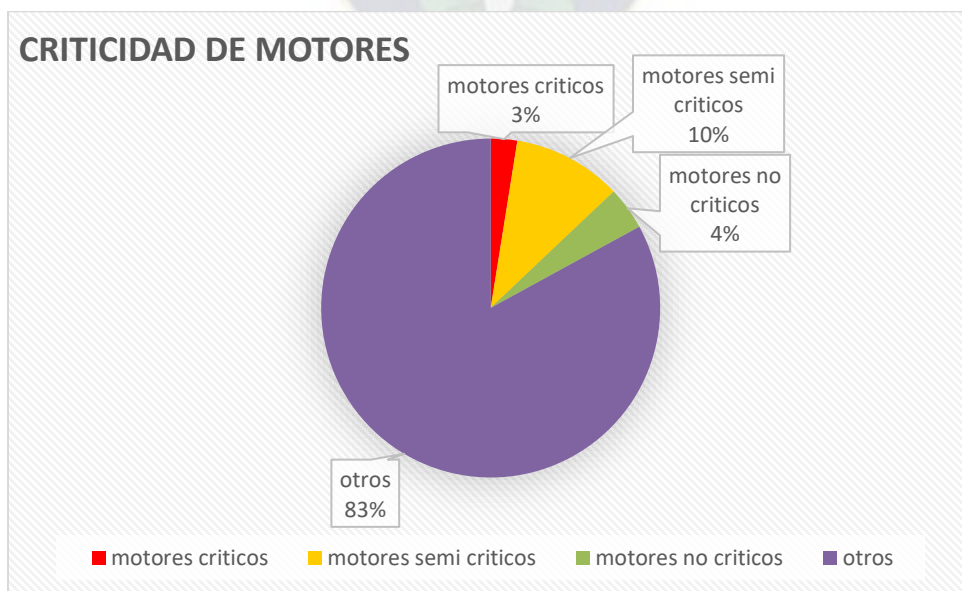
Gráfico 4.1 Porcentaje de equipos agrupados según su Criticidad



Fuente. Elaboración Propia

Con los datos obtenidos del Análisis de Criticidad, llegamos a obtener equipos que se encuentran en el área de alta criticidad, y en los cuales se debe trabajar para aumentar la confiabilidad de nuestro sistema.

Gráfico 4.2 Porcentaje de criticidad de motores.



Fuente. Elaboración Propia

De este total de equipos evaluados, el 17 % son motores eléctricos, de los cuales el 3% son catalogados como críticos. Podemos evidenciar que la mayor parte de los equipos que están catalogados como equipos críticos y semi críticos son los motores.

4.3 Evaluación y selección de técnicas de monitoreo

Para este paso, a pesar de que se tiene varias técnicas y herramientas para evaluar el estado de nuestros motores, seleccionamos las técnicas de análisis de vibraciones y termografía, ya que son las más representativas en el mantenimiento predictivo.

4.3.1 Análisis de Datos de vibraciones - motores eléctricos (Área molino de cemento)

Ya que contamos con datos de vibraciones obtenidos en diferentes periodos de tiempo, realizaremos un análisis del comportamiento que tubo estos motores respecto a el rango de valores permisibles que nos indica la norma ISO 10816-3.

Para este análisis tomamos en cuenta a cuatro motores eléctricos de la planta de cemento (motores críticos) que se muestran en la tabla 4.6, de los cuales contamos con su base de datos de vibraciones globales tomadas en campo.

Equipos seleccionados:

Tabla 4.6 Equipos seleccionados para análisis Predictivo

ITEM	Campo clasif. (Cod Ant)	Equipo	Denominación	Criticidad FxC
129	531.MD140.M01	10008809	MOTOR PRINCIPAL MD140	138
151	531.FN730.M01	10009304	MOTOR VENTILADOR 531HG700	96
239	531.MD150.M01	10009376	MOTOR ELÉCTRICO 531MD150 (531SR150)	126
302	531.FN560.M01	10008833	MOTOR VENTILADOR DE COLECTOR PRINCIPAL	78

Fuente. Elaboración Propia

4.3.1.1 Datos de vibraciones obtenidos

Los datos con que se cuenta son los adquiridos pruebas realizadas en campo como tareas predictivas, estos datos son analizados y procesados para su respectivo análisis, cuyo resultado nos dará información valiosa para la toma de decisiones.

Debemos tomar en cuenta que estos datos se encuentran en unidades de velocidad de vibración (mm/s), unidad de nos recomienda la norma ISO 10816-3 para evaluar nuestros valores medidos.

ANÁLISIS DE VIBRACIONES GLOBALES DE MOTORES CRÍTICOS

Muestra de los datos obtenidos en formato DataFrame de Python para su análisis.

N°	N° OT	SAP EQ HIJO	Cod Ant	DESCRIPCION EQUIPO HIJO	SAP PADRE	DESCRIPCIÓN PADRE	OBSERVACIONES	FECHA	M1V	...	B	C	D	T1	T2	T3	GD	G
1	NaN	10002479	331FN110.M01	MOTOR VENTILADOR 331FN110	10000291	VENTILADOR DE TIRAJE ID FAN		2022-02-07	8.255	...	2.8	7.1	11	29.0	45.0	52.0	NaN	Na
2	NaN	10002479	331FN110.M01	MOTOR VENTILADOR 331FN110	10000291	VENTILADOR DE TIRAJE ID FAN		2022-05-05	8.255	...	2.8	7.1	11	32.0	41.0	44.0	NaN	Na
3	NaN	10002479	331FN110.M01	MOTOR VENTILADOR 331FN110	10000291	VENTILADOR DE TIRAJE ID FAN		2022-06-03	8.890	...	2.8	7.1	11	35.0	45.0	56.0	NaN	Na
4	NaN	10002479	331FN110.M01	MOTOR VENTILADOR 331FN110	10000291	VENTILADOR DE TIRAJE ID FAN		2022-07-20	6.350	...	2.8	7.1	11	33.0	43.0	45.0	NaN	Na
5	NaN	10002479	331FN110.M01	MOTOR VENTILADOR 331FN110	10000291	VENTILADOR DE TIRAJE ID FAN		2022-08-02	8.255	...	2.8	7.1	11	31.0	40.0	43.0	220.0	40
6	NaN	10002479	331FN110.M01	MOTOR VENTILADOR 331FN110	10000291	VENTILADOR DE TIRAJE ID FAN		2022-08-02	8.890	...	2.8	7.1	11	32.0	42.0	48.0	NaN	Na
7	NaN	10002479	331FN110.M01	MOTOR VENTILADOR 331FN110	10000291	VENTILADOR DE TIRAJE ID FAN		2022-08-25	7.620	...	2.8	7.1	11	31.0	45.0	57.0	NaN	Na
8	NaN	10002479	331FN110.M01	MOTOR VENTILADOR 331FN110	10000291	VENTILADOR DE TIRAJE ID FAN		2022-09-14	7.620	...	2.8	7.1	11	30.0	42.0	45.0	NaN	Na
9	NaN	10002479	331FN110.M01	MOTOR VENTILADOR 331FN110	10000291	VENTILADOR DE TIRAJE ID FAN		2022-10-12	6.096	...	2.8	7.1	11	35.0	48.0	53.0	80.0	40
10	NaN	10002479	331FN110.M01	MOTOR VENTILADOR 331FN110	10000291	VENTILADOR DE TIRAJE ID FAN		2022-10-12	6.350	...	2.8	7.1	11	NaN	NaN	NaN	NaN	Na

rows x 34 columns

Muestra de datos ya filtrados para el análisis

Equipo buscado:531.MD140.M01
los datos hallados para ese equipo son:

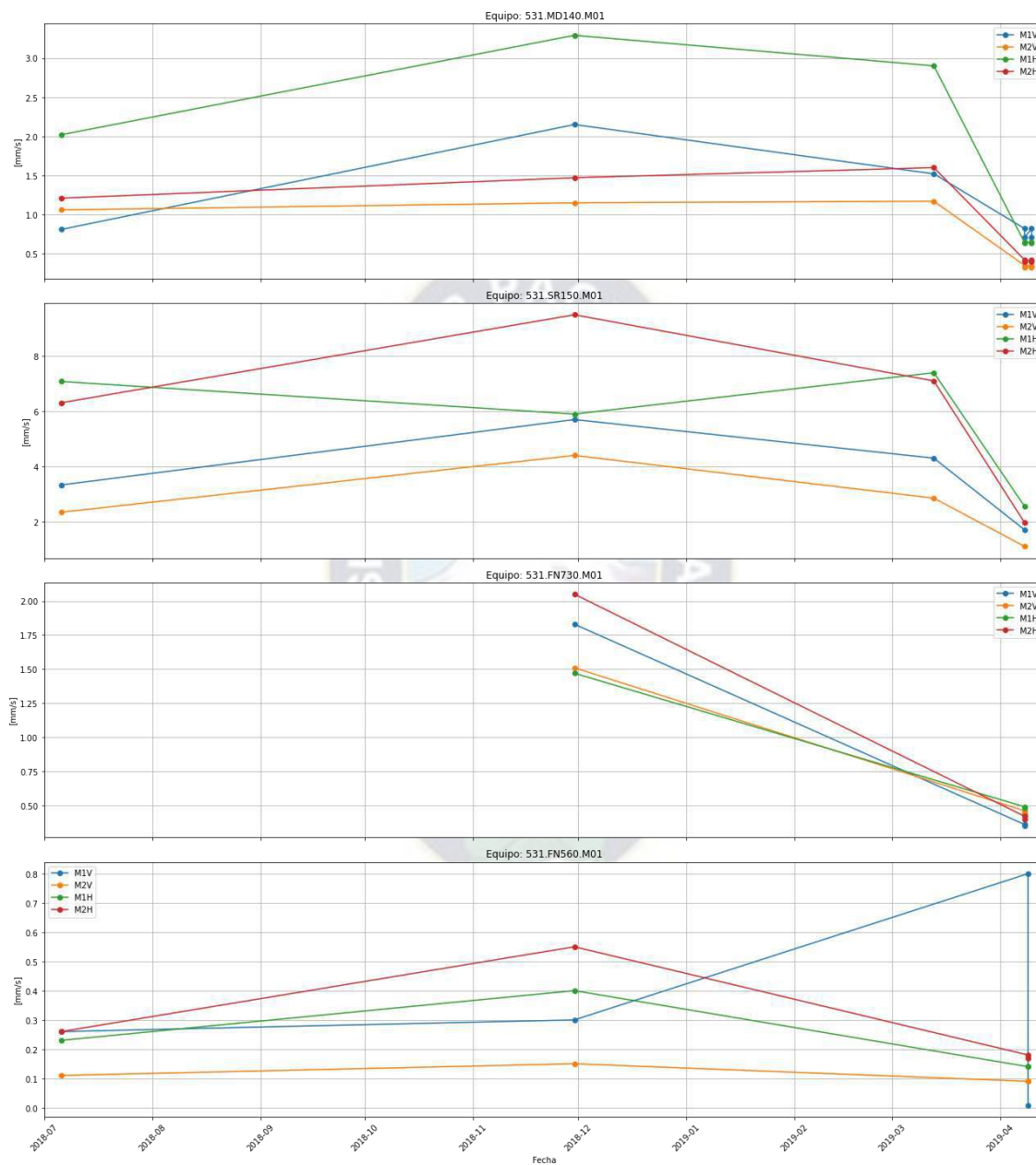
FECHA	M1V	RM1V	M1H	RM1H	M2V	RM2V	M2H	RM2H	M2A	RM2A	Bueno	Regular	Critico
2022-03-08	3.866585	1.42	8.458154	0.88	3.383262	2.39	4.591569	1.14	4.430462	1.04	2.8	7.1	11
2022-05-11	4.188800	1.46	7.813723	0.82	3.302708	1.24	4.511015	1.24	7.572062	0.68	2.8	7.1	11
2022-06-24	4.269354	1.67	0.886092	1.32	2.819385	1.20	5.397108	1.13	5.155446	0.62	2.8	7.1	11
2022-07-12	5.638769	0.98	9.505354	0.96	3.705477	1.07	4.994338	1.06	5.074892	0.56	2.8	7.1	11
2022-07-12	5.638769	0.96	9.505354	0.97	3.705477	1.08	4.994338	1.06	5.074892	0.55	2.8	7.1	11
2022-08-11	5.236000	0.88	8.860923	0.67	3.705477	1.62	4.188800	1.64	4.591569	0.73	2.8	7.1	11

Análisis de tendencias

Con las tendencias que se obtiene de los datos adquiridos en las tareas predictivas podemos ver el comportamiento de los motores seleccionados a lo largo de un periodo de tiempo. Tomamos en cuenta los datos de vibraciones más relevantes como ser los valores de M1V, M2V, M1H, M2H.

Valores obtenidos de vibración de fechas 2018 – 2019

Gráfico 4.3 Valores medidos de Vibraciones Globales (2018-2019)



Fuente. Elaboración Propia

Al observar estos gráficos podemos evidenciar que la adquisición de datos de vibraciones para esas fechas aún estaba en pleno desarrollo, por lo cual no se puede evidenciar un cambio evidente del cambio de vibraciones que sufre el motor por posibles fallas.

Valores obtenidos de vibración de 2022 – 2023

Gráfico 4.4 Valores medidos de Vibraciones Globales (2022-2023)



Fuente. Elaboración propia.

Estos gráficos nos dan un panorama del comportamiento que tuvo el equipo en tiempo respecto a la variación de vibraciones que se ha producido durante su funcionamiento. Se puede observar la evolución del mantenimiento predictivo implementado con respecto a la adquisición de datos de las tareas de monitoreo de vibraciones.

Si bien se puede observar puntos de funcionamiento críticos para los motores en los puntos M1V, M2V, M1H, M2H, ahora se cuenta con datos que nos ayudan a la toma de decisiones y aspectos como la confiabilidad que muestra cada motor en el tiempo de funcionamiento.

ANÁLISIS DE VIBRACIONES GLOBALES PARA MOTOR 531.MD150.M01 EN DIFERENTES PERIODOS DE TIEMPO.

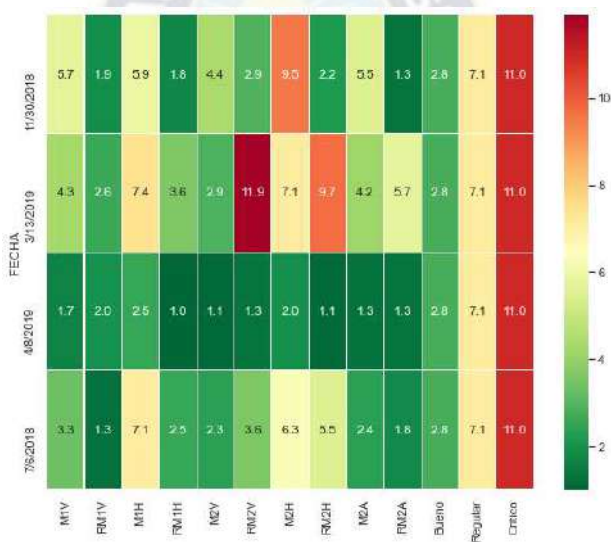
Realizamos una comparación directa de los resultados obtenidos.

Los siguientes gráficos que se presentan, nos dan la capacidad de identificar el estado del motor a plena carga en función de los datos recopilados de vibraciones globales en diferentes periodos de tiempo.

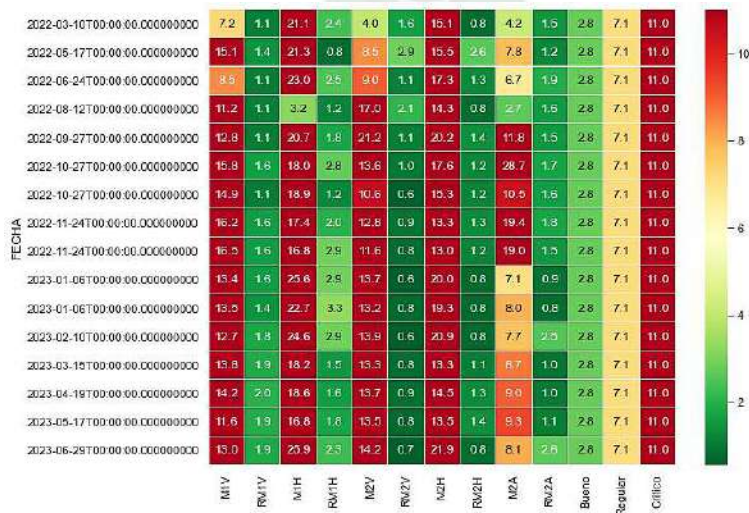
Datos de vibraciones analizados según ISO 10816

Gráfico 4.5 HeatMap de valores medidos de Vibraciones Globales motor 531.MD150

2018 - 2019



2022 -2023

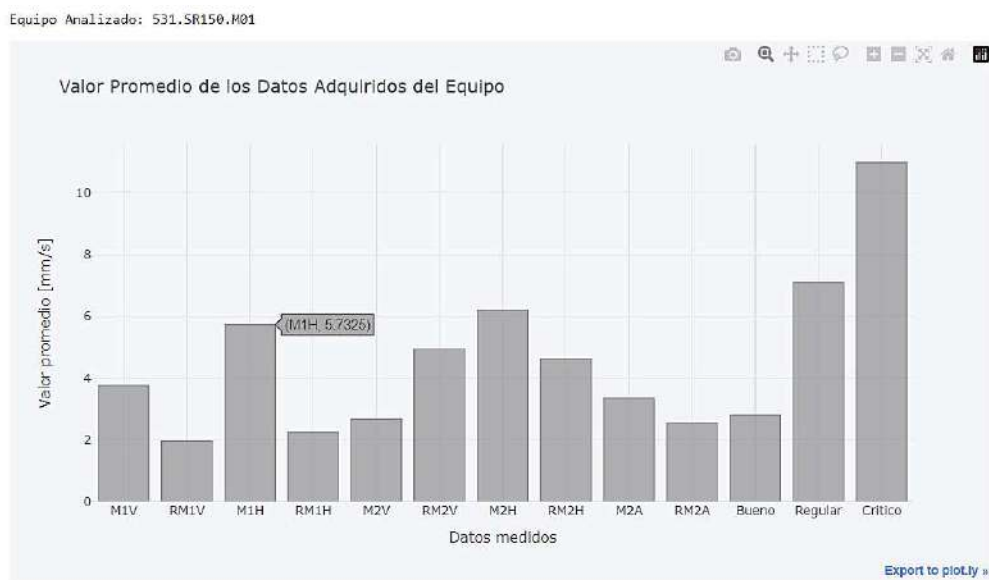


Fuente. Elaboración propia

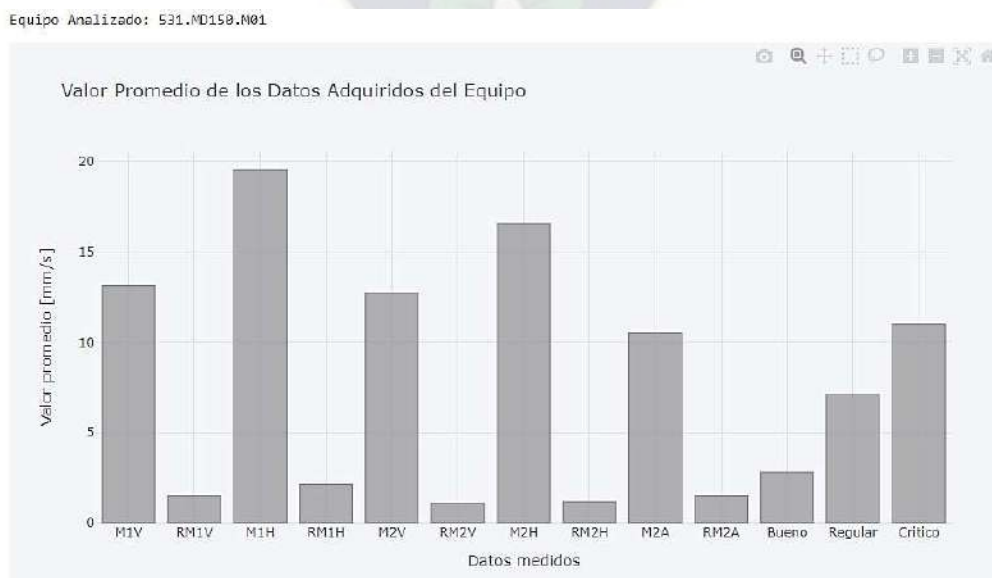
valores promedios – Comparación con límites estándares

Gráfico 4.6 Comparación Valores promedios de Vibraciones Globales motor 531.MD150

2018 – 2019



2022 - 2023

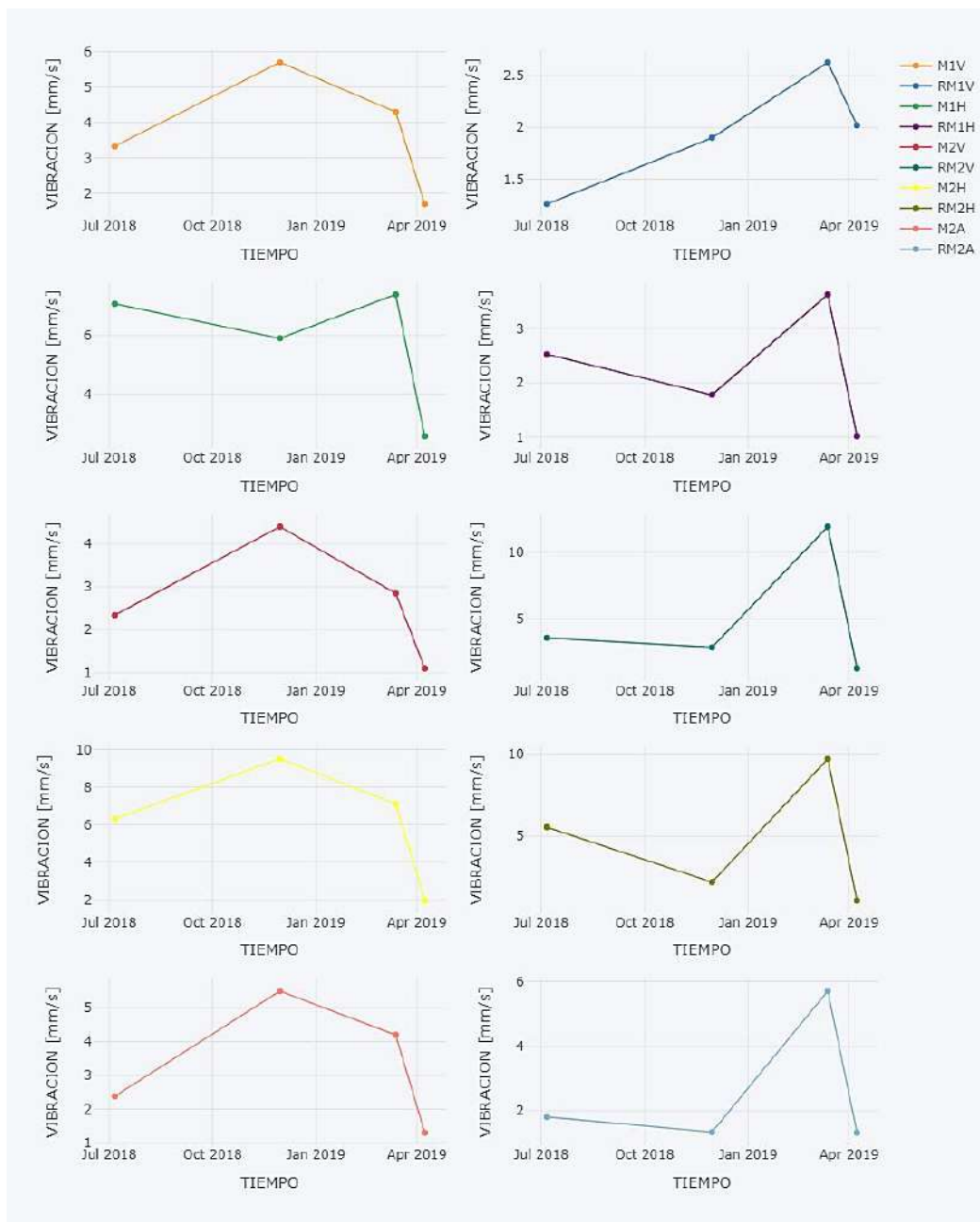


Fuente. Elaboración propia.

Graficas de datos obtenidos para cada punto medido

Datos obtenidos de MOTOR 531.MD150.M01 (2018 - 2019) – vibraciones globales

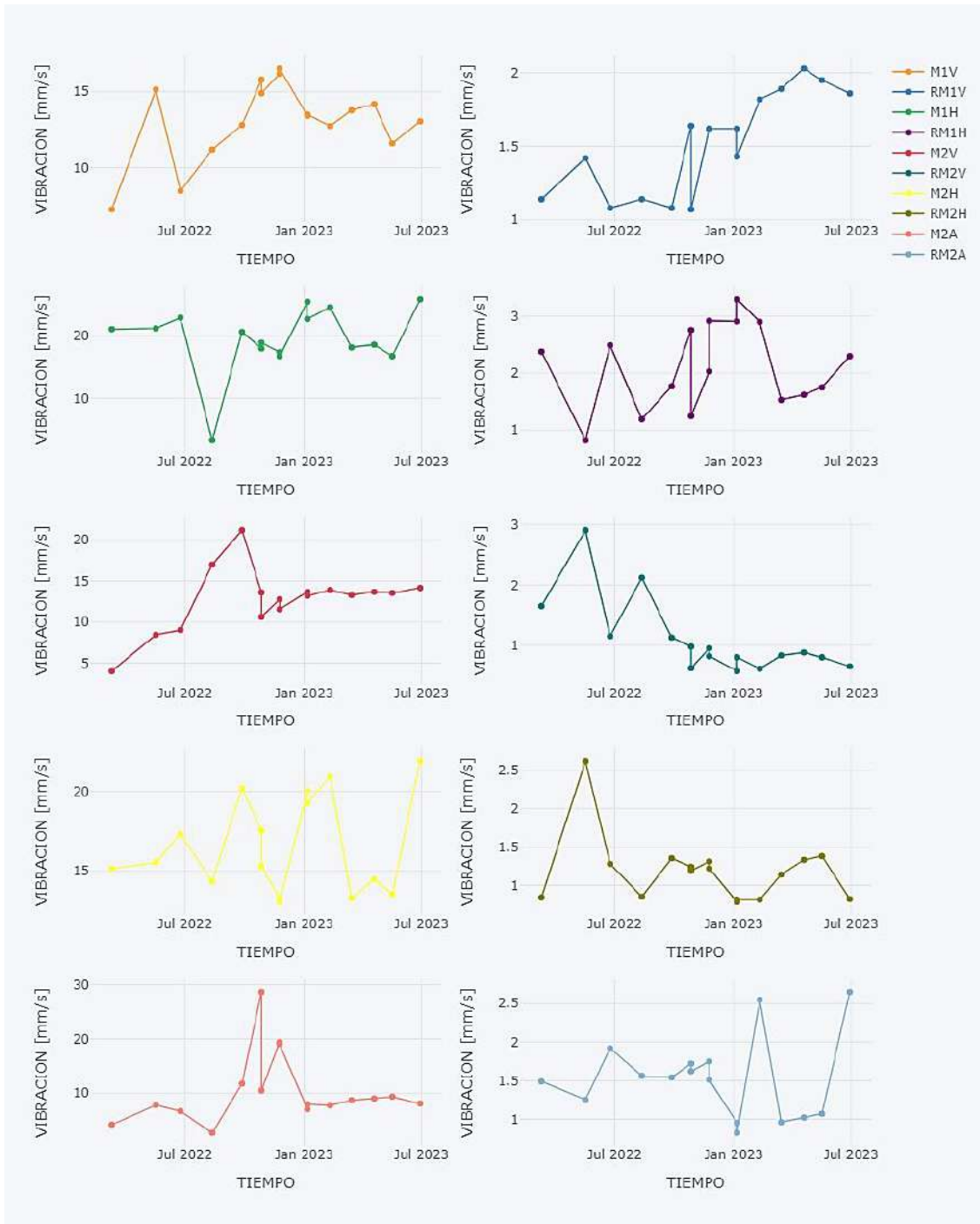
Gráfico 4.7 Subplots de Vibraciones Globales por puntos – motor 531.MD150 (2018-2019)



Fuente. Elaboración propia

Datos obtenidos de MOTOR 531.MD150.M01 (2022 – 2023) – vibraciones globales

Gráfico 4.8 Subplots de Vibraciones Globales por puntos – motor 531.MD150(2022-2023)



Fuente. Elaboración propia

ANÁLISIS GENERAL DE VIBRACIONES GLOBALES PARA MOTOR 531.MD140.M01 EN DIFERENTES PERIODOS DE TIEMPO

Datos obtenidos de MOTOR 531.MD140.M01 (2018 - 2019)

Datos de vibraciones analizados según ISO 10816

Equipo Analizado: 531.MD140

	M1V	RM1V	M1H	RM1H	M2V	RM2V	M2H	RM2H	M2A	RM2A	Bueno	Regular	Critico
count	7.000000	7.000000	7.000000	7.000000	7.000000	7.000000	7.000000	7.000000	7.000000	7.000000	7.000000	7.000000	7.000000
mean	1.077143	0.784286	1.541429	0.665714	0.677143	1.984286	0.845714	1.727143	0.774286	1.051429	2.442857	4.528571	8.214286
std	0.550809	0.169495	1.179455	0.067047	0.421929	1.515441	0.555453	0.802282	0.369362	1.069259	0.243975	1.756620	1.903005
min	0.710000	0.530000	0.640000	0.560000	0.330000	0.950000	0.400000	1.070000	0.450000	0.470000	2.300000	3.500000	7.100000
25%	0.760000	0.760000	0.645000	0.630000	0.340000	1.295000	0.410000	1.230000	0.495000	0.545000	2.300000	3.500000	7.100000
50%	0.820000	0.770000	0.650000	0.700000	0.350000	1.400000	0.420000	1.250000	0.540000	0.640000	2.300000	3.500000	7.100000
75%	1.170000	0.780000	2.460000	0.710000	1.105000	1.800000	1.340000	1.990000	1.030000	0.865000	2.550000	5.300000	9.050000
max	2.150000	1.110000	3.290000	0.720000	1.170000	5.350000	1.600000	3.330000	1.380000	3.430000	2.800000	7.100000	11.000000

Gráfico 4.9 Diagrama de caja-Vibraciones Globales motor531.MD140(2018-2019)

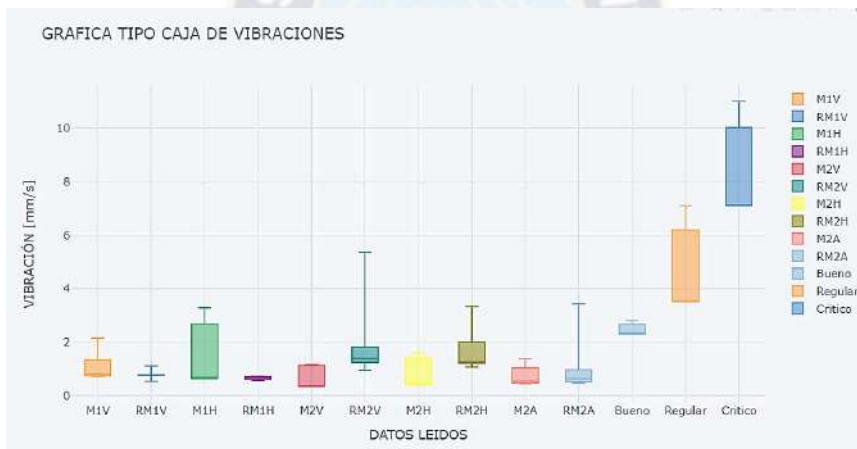


Gráfico 4.10 HeatMap -Vibraciones Globales motor 531.MD140(2018-2019)

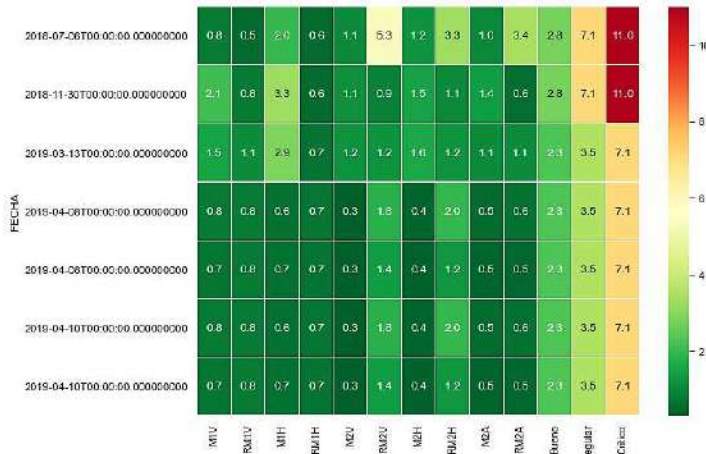
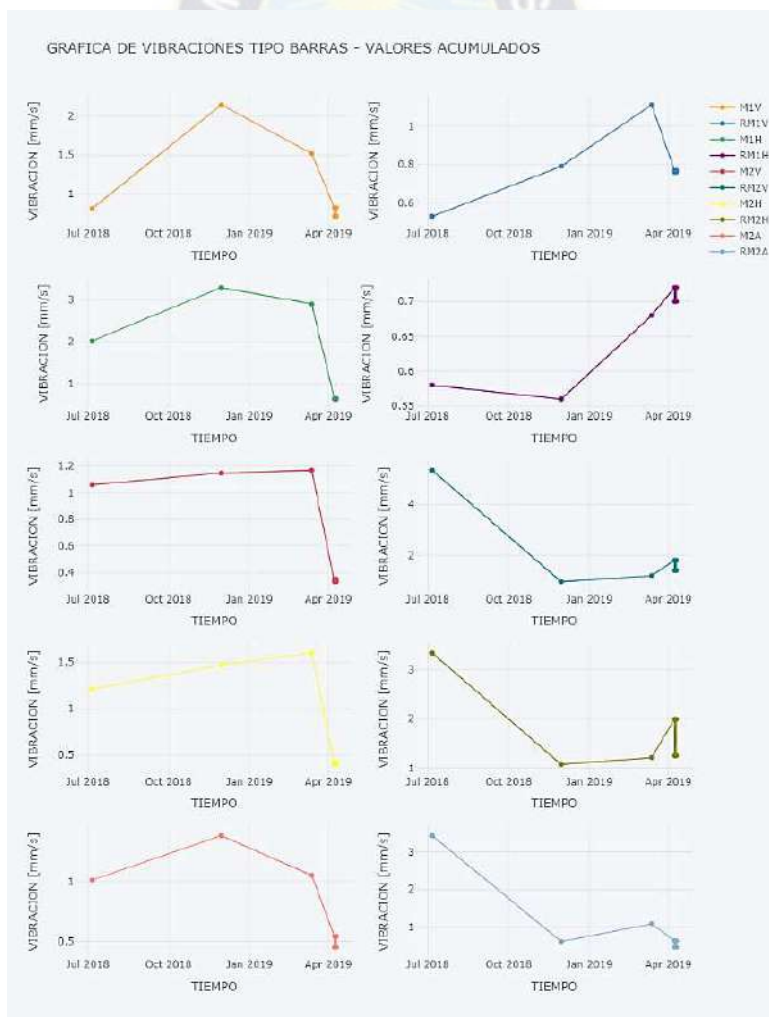


Gráfico 4.11 Valores promedios de Vibraciones Globales motor 531.MD140 (2018-2019)



Gráfico 4.12 Subplots de Vibraciones Globales por puntos – 531.MD140 (2018-2019)



Fuente. Elaboración propia

Datos obtenidos de MOTOR 531.MD140.M01 (2022 - 2023)

Datos de vibraciones analizados según ISO 10816

Equipo Analizado: 531.MD140.M01

	M1V	RM1V	M1H	RM1H	M2V	RM2V	M2H	RM2H	M2A	RM2A	Bueno	Regular	Critico
count	23.000000	23.000000	23.000000	23.000000	23.000000	23.000000	23.000000	23.000000	23.000000	23.000000	2.300000e+01	2.300000e+01	23.0
mean	4.871757	1.402174	6.987171	0.963913	3.199739	1.529130	4.478794	1.305652	4.355511	0.944783	2.800000e+00	7.100000e+00	11.0
std	1.038895	0.535876	2.239157	0.253426	0.486843	0.428559	0.707741	0.280970	0.951597	0.400067	9.081400e-16	2.724420e-15	0.0
min	3.141600	0.730000	0.886092	0.590000	2.029957	0.620000	3.479926	0.950000	2.899938	0.440000	2.800000e+00	7.100000e+00	11.0
25%	4.229077	0.970000	7.008185	0.815000	2.851606	1.235000	3.834363	1.115000	3.931028	0.650000	2.800000e+00	7.100000e+00	11.0
50%	4.543237	1.360000	7.539840	0.960000	3.093268	1.520000	4.478794	1.240000	4.188800	0.790000	2.800000e+00	7.100000e+00	11.0
75%	5.759600	1.605000	8.458154	0.980000	3.705477	1.765000	4.913785	1.445000	4.712400	1.235000	2.800000e+00	7.100000e+00	11.0
max	6.766523	3.360000	9.505354	1.670000	4.108246	2.400000	6.154314	1.980000	7.572062	1.710000	2.800000e+00	7.100000e+00	11.0

Gráfico 4.13 Diagrama de caja - Vibraciones Globales – 531.MD140 (2022-2023)

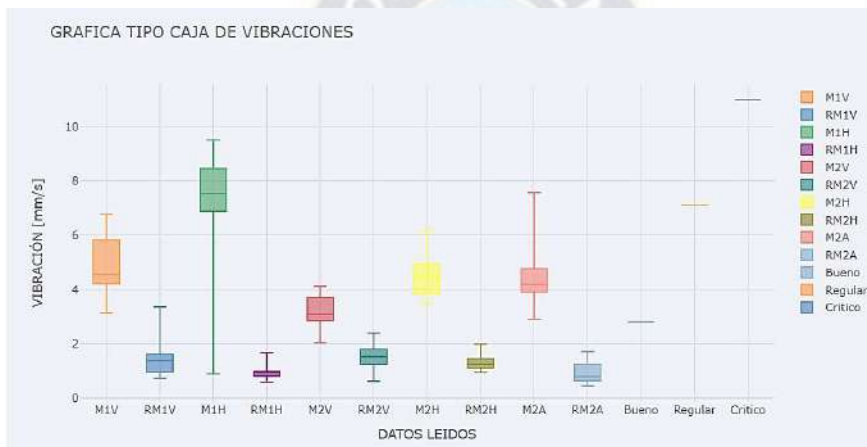
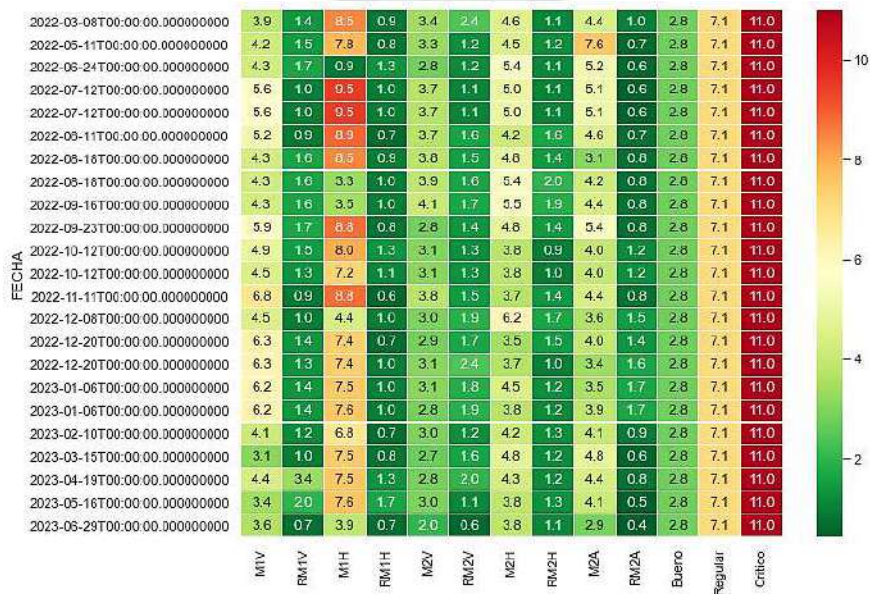


Gráfico 4.14 HeatMap -Vibraciones Globales motor 531.MD140(2022-2023)

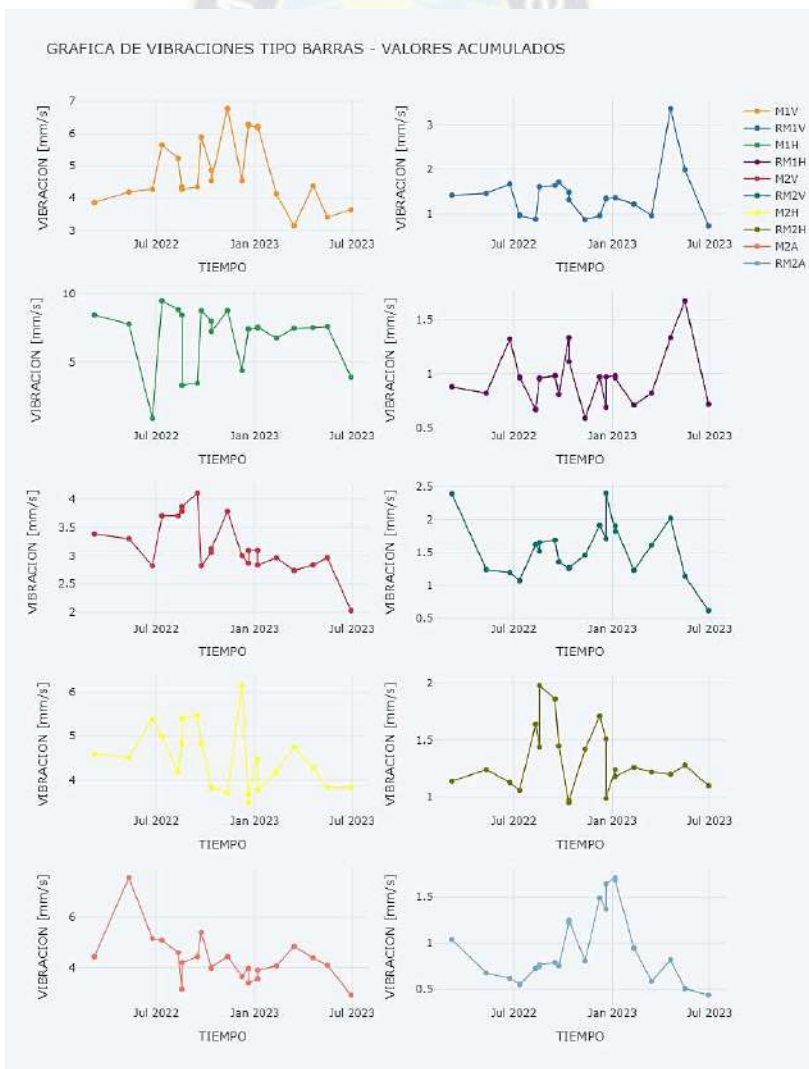


Fuente. Elaboración propia.

Gráfico 4.15 Valores promedios de Vibraciones Globales motor 531.MD140 (2022-2023)



Gráfico 4.16 Subplots de Vibraciones Globales por puntos – 531.MD140 (2018-2019)



Fuente. Elaboración propia.

4.3.2 Análisis de Datos de Termografía

Realizar un análisis de termográfico puede llegar a ser una tarea complicada, dado que carecemos de parámetros o límites establecidos que indiquen los niveles de temperatura que se consideran óptimos o críticos en el funcionamiento del motor. La falta de normativas o estándares que nos proporcione esta información nos obliga a llevar a cabo evaluaciones individuales para cada motor.

La recopilación de datos obtenidos durante las inspecciones predictivas de termografía y la creación de una base de datos de estos resultados puede convertirse en una herramienta sumamente efectiva para evaluar el estado de nuestros motores a lo largo del tiempo. Llevar historiales de medición y el análisis de tendencias, que se lleva a cabo después de la recopilación de datos, junto con el conocimiento previo de los parámetros de funcionamiento del motor como el tipo de aislamiento, tipo de refrigeración, tipo de operación, ambiente de trabajo, entre otros, nos proporciona una guía para el control de la temperatura. El análisis de tendencias es una herramienta valiosa que nos permite prever posibles incrementos de temperatura, que, de no abordarse adecuadamente, podría evolucionar hacia fallas potenciales.

Datos de Termografía en estudio

Los datos recolectados durante las inspecciones predictivas de termografía en los puntos especificados en el Capítulo 3 – figura 3.19, las sometemos a un análisis detallado a través de un programa dedicado, que nos proporciona gráficos de tendencia. Estos gráficos ilustran el comportamiento de la temperatura del motor eléctrico a lo largo del tiempo.

Las siguientes imágenes muestran los datos recopilados en diferentes periodos de tiempo, los que nos permite realizar un análisis comparativo.

Datos obtenidos entre 2018 -2019

	Cod Ant	FECHA	T1	T2	T3
9278	531.MD140.M01	2018-07-06	25.0	54.0	53.0
9279	531.MD140.M01	2018-11-30	33.0	48.0	39.0
9513	531.MD140.M01	2019-03-13	27.0	58.0	69.0
9559	531.MD140.M01	2019-04-08	26.0	30.0	29.0
	Cod Ant	FECHA	T1	T2	T3
9351	531.SR150.M01	2018-07-06	23.0	28.0	30.0
9352	531.SR150.M01	2018-11-30	19.0	20.0	24.0
9516	531.SR150.M01	2019-03-13	20.0	25.0	32.0
	Cod Ant	FECHA	T1	T2	T3
9343	531.FN730.M01	2018-11-30	12.0	20.0	17.0
9561	531.FN730.M01	2019-04-08	26.0	30.0	28.0
	Cod Ant	FECHA	T1	T2	T3
9281	531.FN560.M01	2018-07-06	16.0	26.0	25.0
9282	531.FN560.M01	2018-11-30	11.0	23.0	22.0
9610	531.FN560.M01	2019-04-09	23.0	30.0	28.0

Datos obtenidos entre 2022 -2023

	Cod Ant	FECHA	T1	T2	T3
97	531.FN730.M01	2022-03-08	22.0	30.0	30.0
98	531.FN730.M01	2022-03-23	26.0	34.0	37.0
99	531.FN730.M01	2022-03-23	26.0	35.0	42.0
100	531.FN730.M01	2022-05-11	24.0	32.0	35.0
101	531.FN730.M01	2022-06-24	15.0	22.0	20.0
102	531.FN730.M01	2022-07-12	16.0	22.0	21.0
103	531.FN730.M01	2022-07-12	16.0	22.0	38.0
104	531.FN730.M01	2022-08-11	28.0	34.0	31.0
105	531.FN730.M01	2022-08-18	24.0	30.0	37.0
106	531.FN730.M01	2022-08-18	24.0	30.0	37.0
107	531.FN730.M01	2022-09-23	27.0	39.0	40.0
108	531.FN730.M01	2022-10-12	23.0	29.0	29.0
109	531.FN730.M01	2022-11-17	26.0	35.0	40.0
110	531.FN730.M01	2022-11-18	15.0	26.0	45.0
111	531.FN730.M01	2022-12-08	24.0	27.0	32.0
113	531.FN730.M01	2023-01-11	16.0	24.0	23.0
114	531.FN730.M01	2023-02-10	22.0	27.0	28.0
115	531.FN730.M01	2023-03-15	20.0	26.0	27.0
116	531.FN730.M01	2023-04-19	18.0	24.0	25.0
117	531.FN730.M01	2023-05-16	17.0	19.0	18.0
118	531.FN730.M01	2023-06-29	15.0	17.0	16.0

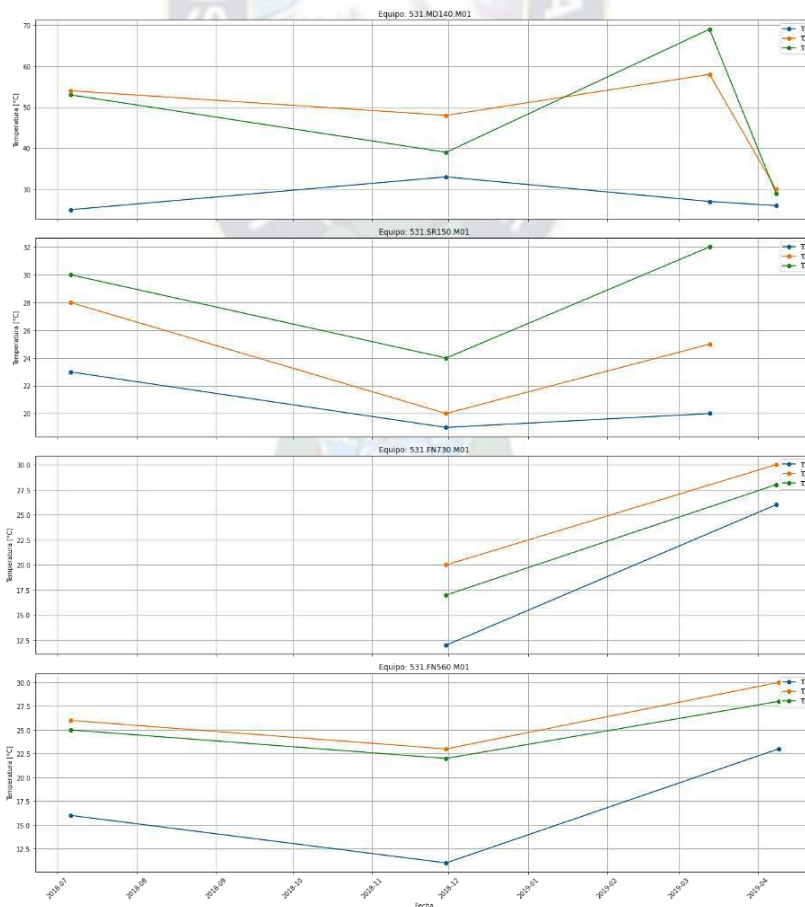
	Cod Ant	FECHA	T1	T2	T3
69	531.FN560.M01	2022-03-08	22.0	34.0	34.0
70	531.FN560.M01	2022-03-08	23.0	35.0	38.0
71	531.FN560.M01	2022-05-05	18.0	24.0	27.0
72	531.FN560.M01	2022-05-05	19.0	29.0	28.0
73	531.FN560.M01	2022-05-11	29.0	39.0	38.0
74	531.FN560.M01	2022-06-24	22.0	34.0	30.0
75	531.FN560.M01	2022-07-12	19.0	32.0	28.0
76	531.FN560.M01	2022-07-12	19.0	32.0	32.0
77	531.FN560.M01	2022-08-12	22.0	36.0	23.0
78	531.FN560.M01	2022-08-18	18.0	29.0	30.0
79	531.FN560.M01	2022-08-18	18.0	32.0	46.0
80	531.FN560.M01	2022-09-16	20.0	31.0	32.0
81	531.FN560.M01	2022-09-23	24.0	37.0	24.0
82	531.FN560.M01	2022-10-12	24.0	37.0	34.0
84	531.FN560.M01	2022-11-11	25.0	33.0	33.0
86	531.FN560.M01	2022-12-08	23.0	42.0	40.0
88	531.FN560.M01	2023-01-06	40.0	42.0	26.0
90	531.FN560.M01	2023-02-10	26.0	47.0	46.0
91	531.FN560.M01	2023-03-15	22.0	33.0	31.0
92	531.FN560.M01	2023-04-19	18.0	32.0	34.0
93	531.FN560.M01	2023-05-04	18.0	28.0	30.0
95	531.FN560.M01	2023-05-16	29.0	52.0	31.0
96	531.FN560.M01	2023-06-29	14.0	27.0	26.0

	Cod Ant	FECHA	T1	T2	T3
119	531.MD140.M01	2022-03-08	31.0	66.0	52.0
120	531.MD140.M01	2022-05-11	35.0	64.0	54.0
121	531.MD140.M01	2022-06-24	22.0	50.0	37.0
122	531.MD140.M01	2022-07-12	28.0	58.0	46.0
123	531.MD140.M01	2022-07-12	28.0	58.0	49.0
124	531.MD140.M01	2022-08-11	40.0	75.0	58.0
126	531.MD140.M01	2022-08-18	28.0	64.0	50.0
127	531.MD140.M01	2022-09-16	30.0	69.0	55.0
128	531.MD140.M01	2022-09-23	36.0	72.0	57.0
129	531.MD140.M01	2022-10-12	27.0	62.0	47.0
131	531.MD140.M01	2022-11-11	31.0	62.0	48.0
132	531.MD140.M01	2022-12-08	27.0	59.0	43.0
133	531.MD140.M01	2022-12-20	29.0	66.0	48.0
135	531.MD140.M01	2023-01-06	44.0	52.0	31.0
137	531.MD140.M01	2023-02-10	31.0	60.0	49.0
138	531.MD140.M01	2023-03-15	30.0	63.0	49.0
139	531.MD140.M01	2023-04-19	28.0	63.0	50.0
140	531.MD140.M01	2023-05-16	27.0	59.0	46.0
141	531.MD140.M01	2023-06-29	22.0	42.0	45.0

	Cod Ant	FECHA	T1	T2	T3
142	531.MD150.M01	2022-03-10	20.0	27.0	27.0
143	531.MD150.M01	2022-05-17	18.0	27.0	28.0
144	531.MD150.M01	2022-06-24	26.0	38.0	37.0
145	531.MD150.M01	2022-08-12	25.0	36.0	39.0
146	531.MD150.M01	2022-09-27	25.0	32.0	36.0
147	531.MD150.M01	2022-10-27	25.0	36.0	38.0
149	531.MD150.M01	2022-11-24	26.0	38.0	34.0
151	531.MD150.M01	2023-01-06	17.0	29.0	42.0
153	531.MD150.M01	2023-02-10	19.0	31.0	41.0
154	531.MD150.M01	2023-03-15	24.0	31.0	37.0
155	531.MD150.M01	2023-04-19	26.0	32.0	37.0
156	531.MD150.M01	2023-05-17	26.0	33.0	38.0
157	531.MD150.M01	2023-06-29	21.0	33.0	43.0

ANÁLISIS DE TERMOGRAFÍA PARA MOTORES CRÍTICOS (2018 - 2019)

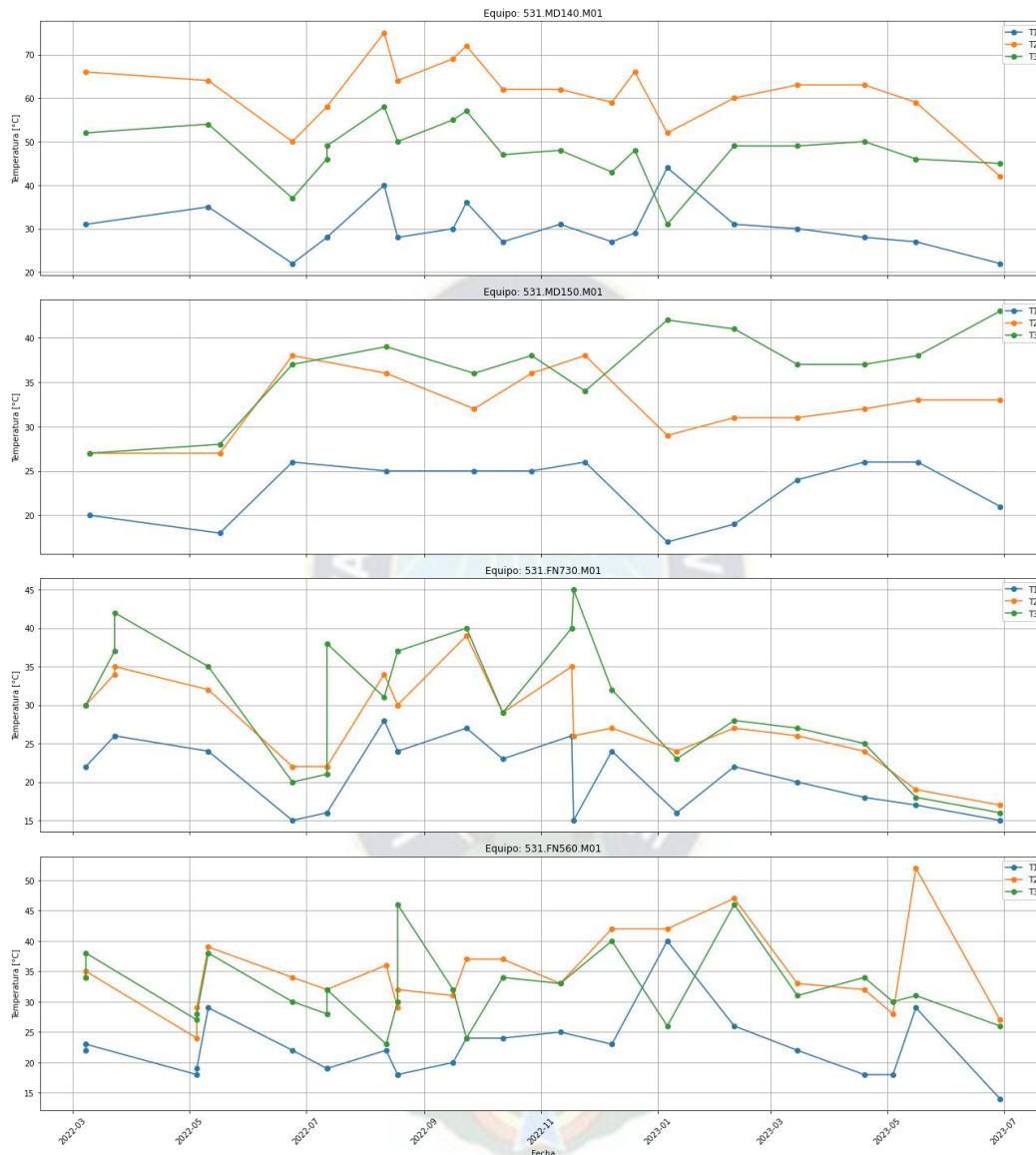
Gráfico 4.17 Subplots de datos de Termografía para motores críticos (2018 – 2019)



Fuente. Elaboración propia.

ANÁLISIS DE TERMOGRAFÍA PARA MOTORES CRÍTICOS (2022 - 2023)

Gráfico 4.18 Subplots de datos de Termografía para motores críticos (2022 - 2023)



Fuente. Elaboración propia.

A partir del análisis previo, se evidencia que la recopilación de una mayor cantidad de datos obtenidos nos da la capacidad de visualizar los cambios de temperatura y comprender mejor las tendencias que pueden surgir. Este conocimiento es fundamental para tomar decisiones informadas en relación con el funcionamiento del motor, su capacidad de brindar servicio de manera continua y la capacidad de anticiparnos a posibles fallos, lo que nos permite planificar de manera eficiente el mantenimiento preventivo o correctivo necesario.

ANÁLISIS DE TERMOGRAFÍA PARA MOTOR 531.MD140.M01

Datos recopilados de termografía motor 531.MD140.M1

A partir de los datos recopilados para este motor, hemos generados dos gráficos que representan directamente la variación de temperatura durante su funcionamiento. Estos gráficos nos permiten visualizar los cambios en el comportamiento térmico del motor y analizar su desempeño.

	Cod Ant	FECHA	T1	T2	T3	Promedio
119	531.MD140.M01	2022-03-08	31.0	66.0	52.0	49.666667
120	531.MD140.M01	2022-05-11	35.0	64.0	54.0	51.000000
121	531.MD140.M01	2022-06-24	22.0	50.0	37.0	36.333333
122	531.MD140.M01	2022-07-12	28.0	58.0	46.0	44.000000
123	531.MD140.M01	2022-07-12	28.0	58.0	49.0	45.000000
124	531.MD140.M01	2022-08-11	40.0	75.0	58.0	57.666667
126	531.MD140.M01	2022-08-18	28.0	64.0	50.0	47.333333
127	531.MD140.M01	2022-09-16	30.0	69.0	55.0	51.333333
128	531.MD140.M01	2022-09-23	38.0	72.0	57.0	55.000000
129	531.MD140.M01	2022-10-12	27.0	62.0	47.0	45.333333
131	531.MD140.M01	2022-11-11	31.0	62.0	48.0	47.000000
132	531.MD140.M01	2022-12-08	27.0	59.0	43.0	43.000000
133	531.MD140.M01	2022-12-20	29.0	66.0	48.0	47.666667
135	531.MD140.M01	2023-01-06	44.0	52.0	31.0	42.333333
137	531.MD140.M01	2023-02-10	31.0	60.0	49.0	46.666667
138	531.MD140.M01	2023-03-15	30.0	63.0	49.0	47.333333
139	531.MD140.M01	2023-04-19	28.0	63.0	50.0	47.000000
140	531.MD140.M01	2023-05-16	27.0	59.0	46.0	44.000000
141	531.MD140.M01	2023-06-29	22.0	42.0	45.0	36.333333

Histograma de distribución de temperaturas

Gráfico 4.19 Histograma de distribución de temperaturas – motor 531.MD140.M01

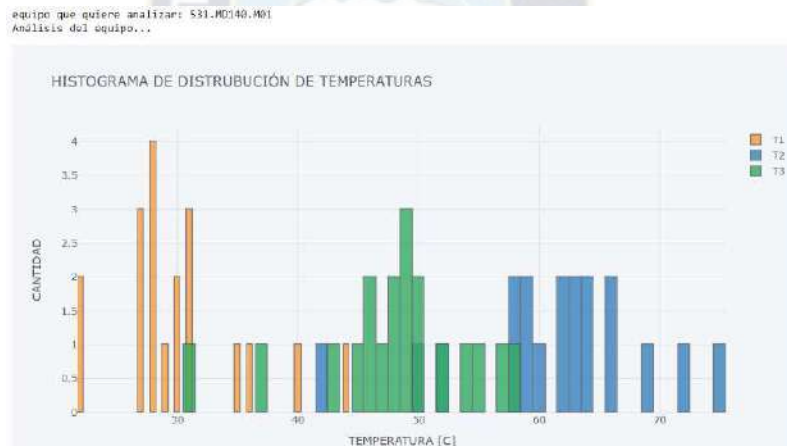


Gráfico 4.20 Valores promedios de temperaturas en motor 531.MD140.M01



Fuente. Elaboración propia.

Gráfico 4.21 Curvas de temperatura por tipo de datos – motor 531.MD140.M01

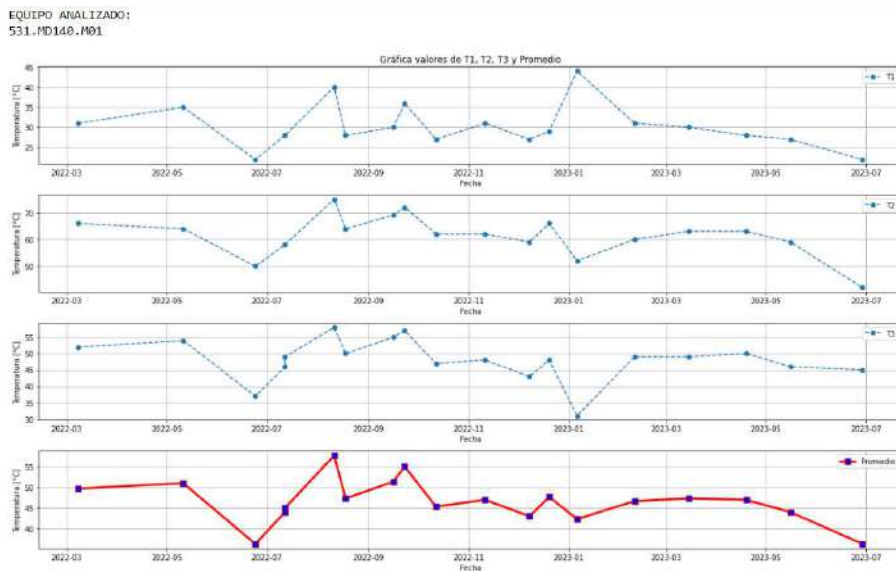
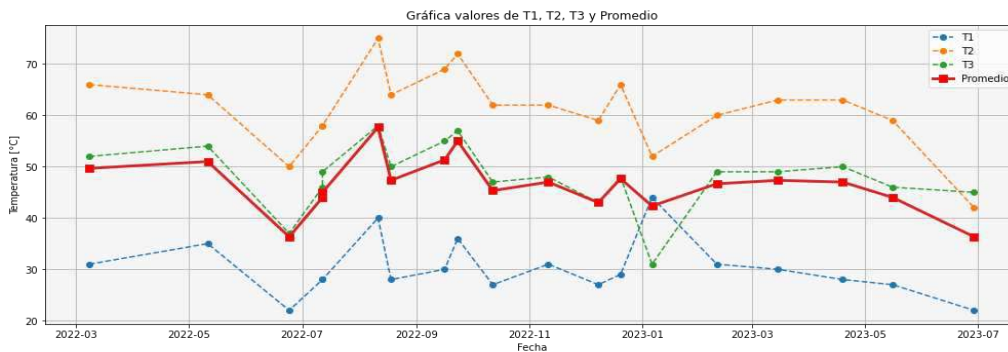


Gráfico 4.22 Curvas del comportamiento térmico – motor 531.MD140.M01



Fuente. Elaboración propia.

4.4 Diagnóstico y acciones correctivas realizadas en puntos críticos.

Considerando la posibilidad de fallos en el motor eléctrico, respaldada por las técnicas de vibraciones y termografía que pueden mostrar tendencias hacia posibles problemas, se procede a la planificación de un mantenimiento preventivo programado. En esta etapa, se llevan a cabo pruebas estáticas para verificar el estado del aislamiento del motor, asegurando así su integridad y funcionamiento óptimo.

A continuación, se muestra el mantenimiento que se realiza a el motor 531.MD140, mostrando de forma resumida todas las tareas realizadas en su intervención.

4.4.1 Mantenimiento motor principal 531.MD140.M01

- Se realiza las mediciones de aislamiento con el equipo **SCHLEICH** al motor principal del separador 531.MD140 se encuentra con un índice bajo de polarización.

Toma de medidas antes del mantenimiento:

Tabla 4.7 Datos obtenidos de DAR/IP antes mto. - motor 531.MD140.M01

DAR / PI					
Test duration	Tensión real	Corriente	Resistencia	DAR	PI
30.0 s	506.4 V	0.0019 mA	39.727 MOhm	--	--
60.0 s	506.4 V	0.0019 mA	40.1859 MOhm	--	--
120.0 s	506.4 V	0.0019 mA	40.5384 MOhm	--	--
180.0 s	506.5 V	0.0019 mA	39.9519 MOhm	1.00	--
240.0 s	506.4 V	0.0019 mA	40.2807 MOhm	--	--
300.0 s	506.4 V	0.0019 mA	40.1619 MOhm	--	--
360.0 s	506.4 V	0.0019 mA	39.5769 MOhm	--	--
420.0 s	506.3 V	0.0019 mA	39.4155 MOhm	--	--
480.0 s	506.3 V	0.002 mA	39.0779 MOhm	--	--
540.0 s	506.3 V	0.002 mA	39.1528 MOhm	--	--
600.0 s	506.3 V	0.002 mA	38.9944 MOhm	--	0.97

Fuente. Base de datos de planta

De los datos adquiridos que se presentan en la anterior tabla se puede observar que los valores de índice de polarización (PI) e índice de Absorción (DAR) se encuentran entre los rangos de valores críticos esto en función de la tabla 3.14, por lo que se llega a intervenir el motor programando su mantenimiento y realizando tareas tanto correctivas como preventivas. A continuación, se hace un detalle de las tareas que se realizan al motor.

Trabajos realizados:

- Se realiza el mantenimiento y Cambio de rodamientos motor 531.MD140 el mantenimiento dura un lapso de 3 días
- Se realiza el lavado con solvente del estator y rotor.
- Se realiza el proceso de secado a una temperatura de 120[°C] por un lapso de 7 horas continuas luego se reduce la temperatura a 85[°C] por un lapso de 9 horas continuas.
- Se procede con el barnizado **ANTI FLASH** al estator y rotor.
- Se procede nuevamente con el secado de barnizado del estator y rotor a una temperatura de 90[°C] por el lapso de 8 horas continuas.
- Se cambia los dos rodamientos del motor 6322 aislado /C3 y 6322 normal
- Se realiza nuevamente pruebas de aislamiento al motor 531.MD140 con el equipo SCHLEICH y se toma medidas del índice de polarización (IP) y absorción dieléctrica DAR.

Toma de medidas después del mantenimiento

Tabla 4.8 Datos obtenidos de DAR/IP después de Mtto. - motor 531.MD140.M01

DAR / PI					
Test duration	Tensión real	Corriente	Resistencia	DAR	PI
30.0 s	505.8 V	0.0003 mA	356.8733 MOhm	--	--
60.0 s	506.2 V	0.0002 mA	600.4867 MOhm	--	--
120.0 s	506.0 V	0.0002 mA	595.9586 MOhm	--	--
180.0 s	506.1 V	0.0001 mA	1252.639 MOhm	3.10	--
240.0 s	505.8 V	0.0001 mA	1668.036 MOhm	--	--
300.0 s	505.8 V	0.0001 mA	1713.858 MOhm	--	--
360.0 s	505.9 V	0.0001 mA	1999.573 MOhm	--	--
420.0 s	505.9 V	0.00 mA	2316.315 MOhm	--	--
480.0 s	505.9 V	0.00 mA	2498.831 MOhm	--	--
540.0 s	505.9 V	0.00 mA	3013.059 MOhm	--	--
600.0 s	505.9 V	0.00 mA	2804.904 MOhm	--	4.66

Fuente. Base de datos de planta

Relación de Absorción Dieléctrica	Índice de Polarización	Clasificación del estado de Aislación
RAD < 1,1	IP < 1	Peligroso
1,1 < RAD ≤ 1,25	IP < 1,5	Cuestionable
1,25 < RAD ≤ 1,4	1,5 ≤ IP < 2	Aceptable
1,4 < RAD ≤ 1,6	2 ≤ IP < 3	Bueno
1,6 < RAD	3 ≤ IP < 4	Muy bueno
	4 ≤ IP	Excelente

Se puede observar que los nuevos valores obtenidos de DAR y PI luego del mantenimiento realizado se en un rango excelente, lo que garantiza el estado del aislamiento del motor y su buen funcionamiento.

Medición de resistencias

Se realizó la medición de resistencia de bobinado a 19°C obteniendo los valores 27.54[mΩ], 27.47[mΩ] y 27.50 [mΩ] en cada fase.

Figura 4.2 Medición de resistencia de bobinas – motor 531.MD140.M01



4 Fuente. Base de datos de planta

Obteniendo una desviación de máxima de 0.13% del promedio.

Medición de aislamiento de bobinado

Se realizó el megado de las bobinas del motor a 19 [°C] con un voltaje de prueba de 1011[V]. Tomando en cuenta que como la tensión nominal del rotor es de 1628[V] y según norma EASA el voltaje de prueba debe estar entre 1000[V] y 2500 [V] (de la tabla 3.12).

4.2.1 Prueba de Resistencia de Aislamiento

La tensión de prueba debe aplicarse durante un minuto (Referencia: IEEE Stds. 43, Sec. 5.4 y 12.2.)

DIRECTRICES PARA LAS TENSIONES DE CORRIENTE CONTINUA UTILIZADAS EN LA PRUEBA DE RESISTENCIA DE AISLAMIENTO

Tensión Nominal del Bobinado (V)*	Tensión C.C. para la Prueba de Resistencia de Aislamiento (V)
<1000	500
1000 - 2500	500 - 1000
2501 - 5000	1000 - 2500
5001 - 12,000	2500 - 5000
>12,000	5000 - 10,000

Obteniendo un índice de absorción DAR de 1.57, un IP de 5.88 y una medida final a los 10 min de prueba de 17.91 [GΩ]

Figura 4.3 Medidas de DAR/IP motor 531.MD140.M01



Fuente. Tareas predictivas - Base de datos de planta

Tomando en cuenta los parámetros obtenidos y los establecidos en la norma y además que el valor de resistencia obtenido el primer minuto fue de 3.046 [GΩ] no se tiene observaciones en las mediciones (la prueba fue realizado con las anillas conectadas a 20.9[°C]).

4.2.2 Prueba de Índice de Polarización (I.P.)

La prueba de índice de polarización (I.P.) debe ser realizada aplicando durante 10 minutos el mismo nivel de tensión descrito en el punto 4.2.1. El valor mínimo de I.P. recomendado para bobinados con aislamientos clase B o superiores es 2.0 (Referencias: IEEE Stds. 43, Sec. 12.2; y IEEE Stds. 432, App. A2).

Si el valor de la resistencia de aislamiento medida al primer minuto es superior a 5000 MOhms, el índice de polarización calculado (I.P.) puede que no sea significativo. En estos casos, es posible que el valor de I.P. no sea tenido en cuenta para evaluar el estado del aislamiento (Referencia: IEEE 43, Sec. 12.2.2).

Prueba de Alta Tensión (HiPot)

Se realizó la prueba HiPot a 7460, tomando en cuenta como referencia 3.4 V_{nom}+1700 V

MÁQUINAS SINCRÓNICAS DEC.A. CON ANILLOS COZANTES	BOBINADO DEL ESTATOR	BOBINADO DE CAMPO
MOTORES	1700 voltios + 3.4 veces la tensión nominal de la maquina	<p>Método de arranque 1* 17 veces la tensión de excitación nominal pero no menos de 4250 voltios ni mas de 8500 voltios</p> <p>Método de arranque 2* 3.4 veces la caída IR a través del resistor pero no menos de 4250 voltios</p>

Figura 4.4 Prueba HIPOT - motor 531.MD140.M01



Fuente. Tareas predictivas - Base de datos de planta

Prueba de impulso (Surge)

Se realizaron 2 pruebas de impulso (surge) con 7340 [V].

1. Con las anillas conectadas

Figura 4.5 Prueba surge con anillas conectadas - motor 531.MD140.M01



2. Con las anillas desconectadas

Figura 4.6 Prueba surge con anillas desconectadas - motor 531.MD140.M01



Fuente. Tareas predictivas - Base de datos de planta

En ninguno de los casos se presentan variaciones en la forma de onda entre fases, no se aprecia una variación de frecuencia ni otra señal que detone algún problema en el aislamiento del bobinado.

4.5 Análisis con los Indicadores de Desempeño MTBF y MTTR.

Para este análisis se cuenta con datos ya obtenidos del **tiempo entre fallas (TBF)** y el **tiempo de reparación (TTR)** para cada motor presente en nuestra lista de equipos del Área en estudio ya mencionada anteriormente. Con los datos obtenidos realizamos los cálculos para cada motor con las respectivas ecuaciones de estos indicadores (ecuaciones 3.16 – 3.17 del capítulo 3) cuyos resultados se muestran en el cuadro expuesto en la Tabla 4.8. Cabe mencionar que esta tabla solo

muestra los primeros veinte motores de nuestro grupo de equipos en estudio, y que los cálculos lo realizamos de forma directa mediante el programa realizado en Excel para dichos cálculos. También debemos tener en cuenta los datos necesarios establecidos previamente como el tiempo de funcionamiento de los equipos que se refleja en ANEXO D.2, cuyos valores son establecidos según el funcionamiento del área de Molienda siendo el punto de partida para los cálculos realizados.

Tabla 4.9 Tiempo de Funcionamiento del Área de Molienda

	MESES (*)	HORAS - DIA	TOTAL HORAS
FUNCIONAMIENTO	6	24	4320.00
	VALORES MODIFICABLES		

Fuente. Elaboración propia.

Ejemplo de cálculos para primer equipo (ÍTEM 7 – MOTOR 10002143)

Datos:

$$t_{disp} = 4320 \text{ [horas]}$$

$$t_{inact} = 12 \text{ [horas]}$$

$$n = 5 \text{ [fallas]}$$

Donde:

t_{disp} : Tiempo total disponible o horas de funcionamiento programadas.

t_{inact} : Tiempo de inactividad.

n = número de fallas.

MTBF:

$$MTBF_7 = \frac{\text{Tiempo total disponible} - \text{Tiempo de inactividad [horas]}}{\text{Número de paradas}} =$$

$$MTBF_7 = \frac{4320 - 12}{5} = 861.6 \text{ [horas]}$$

MTTR:

$$MTTR_7 = \frac{\text{Tiempo total de mantenimiento correctivo [horas]}}{\text{Número de operaciones de reparación}} =$$

$$MTTR_7 = \frac{12}{5} = 2.4 \text{ [horas]}$$

Notar que para este cálculo el tiempo de mantenimiento correctivo es igual al tiempo de inactividad del equipo y el número de operaciones de reparación es igual al número de fallas que tuvo el equipo. Con este criterio es como se genera la tabla 4.8 mostrada donde se realizaron los cálculos de estos valores para cada motor.

Tabla 4.10 Lista de equipos en estudio con datos calculados de MTBF Y MTTR.

ITEM	Campo clasif. (Cod Ant)	Equipo	Denominación	HORAS PROGRAMA DAS	Cantidad FALLAS	HORAS TRABAJO APROX	TIEMPO DE INACTIVIDAD	MTBF [Hrs]	MTTR [Hrs]
7	531235631	10002143	MOTOR	4320.00	5	4308.00	12.00	861.60	2.4
15	531253591	10002308	MOTORREDUCTOR VALVULA ROTATORIA	4320.00	3	4305.00	15.00	1435.00	5.0
17	531255631	10002311	MOTOR VENTILADOR	4320.00	4	4312.00	8.00	1078.00	2.0
19	531255513	10002315	MOTOR VENTILADOR	4320.00	6	4315.00	5.00	719.17	0.8
28	531435631	10002658	MOTOR	4320.00	3	4312.00	8.00	1437.33	2.7
34	531.EH221.M01	10009228	MOTOR ELÉCTRICO 1 531EH221	4320.00	2	4305.00	15.00	2152.50	7.5
35	531.EH221.M02	10009229	MOTOR ELÉCTRICO 2 531EH221 AUXILIAR	4320.00	0	4320.00	0.00	#jDIV/0!	#jDIV/0!
43	531.FN022.M01	10009241	MOTOR DE VENTILADOR 531BF020	4320.00	1	4315.00	5.00	4315.00	5.0
51	531.BC010.M01	10009245	MOTOR ELÉCTRICO 531BC010	4320.00	5	4310.00	10.00	862.00	2.0
65	531.WF070.M01	10009253	MOTORREDUCTOR DE DOS ETAPAS 531WF070	4320.00	2	4315.00	5.00	2157.50	2.5
69	531.SX072.M01	10009257	MOTORREDUCTOR LIMPIADOR 531WF070	4320.00	4	4311.00	9.00	1077.75	2.3
84	531.BC270.M01	10009264	MOTOR ELÉCTRICO 531BC270	4320.00	2	4317.00	3.00	2158.50	1.5
103	531.BE220.M01	10009233	MOTOR ELÉCTRICO PRINCIPAL 531BE220	4320.00	2	4310.00	10.00	2155.00	5.0
104	531.BE220.FVNR01	10009234	ARRANCADOR B.T. MOTOR PRINC. 531BE220	4320.00	2	4315.00	5.0	2157.50	2.5
107	531.BE220.M02	10009237	MOTORREDUCTOR AUXILIAR 531BE220	4320.00	0	4320.00	0.00	#jDIV/0!	#jDIV/0!
108	531.BE220.FVNR02	10009238	ARRANCADOR B.T. MOTORRED. 531BE220	4320.00	0	4318.00	2.0	#jDIV/0!	#jDIV/0!
113	531.FN292.M01	10009272	MOTOR DE VENTILADOR 531BF290	4320.00	1	4314.00	6.00	4314.00	6.0
118	531.MS011.M01	10009275	MOTORREDUCTOR 531MS011	4320.00	1	4295.00	25.00	4295.00	25.0
124	531.BC200.M01	10009279	MOTOR ELÉCTRICO 531BC200	4320.00	2	4318.00	2.00	2159.00	1.0
129	531.MD140	10008623	MOTOR PRINCIPAL MD140	4320.00	3	4302.00	18.00	1434.00	6.0

Fuente. Elaboración propia.

Ya con estos valores calculados podemos obtener gráficos, como histogramas, que nos proporcionan una visión integral de los motores y la relación que existe entre los valores calculados en la tabla. Esto incluye la relación que existe entre el número de fallas y el tiempo de inactividad de cada equipo (ver gráfico 4.23), y la relación entre el MTBF y el MTTR (ver gráfico 4.24). Estos gráficos ofrecen información crucial para la toma de decisiones en el ámbito del mantenimiento predictivo.

La correlación entre el número de fallas y el tiempo de inactividad de los motores, nos proporciona una visión de la confiabilidad de cada motor. Se observa que a menor número de fallas mayor es la confiabilidad. Asimismo, la relación entre el MTBF y el MTTR refleja la disponibilidad de cada motor, donde un menor MTTR se traduce en una mayor disponibilidad. La relación entre el MTTR y el MTBF es de 1:100, un valor promedio basado en datos prácticos de la industria que puede ajustarse según nuestras necesidades.

Gráfico 4.23 Histograma de fallas y tiempo de inactividad por motor

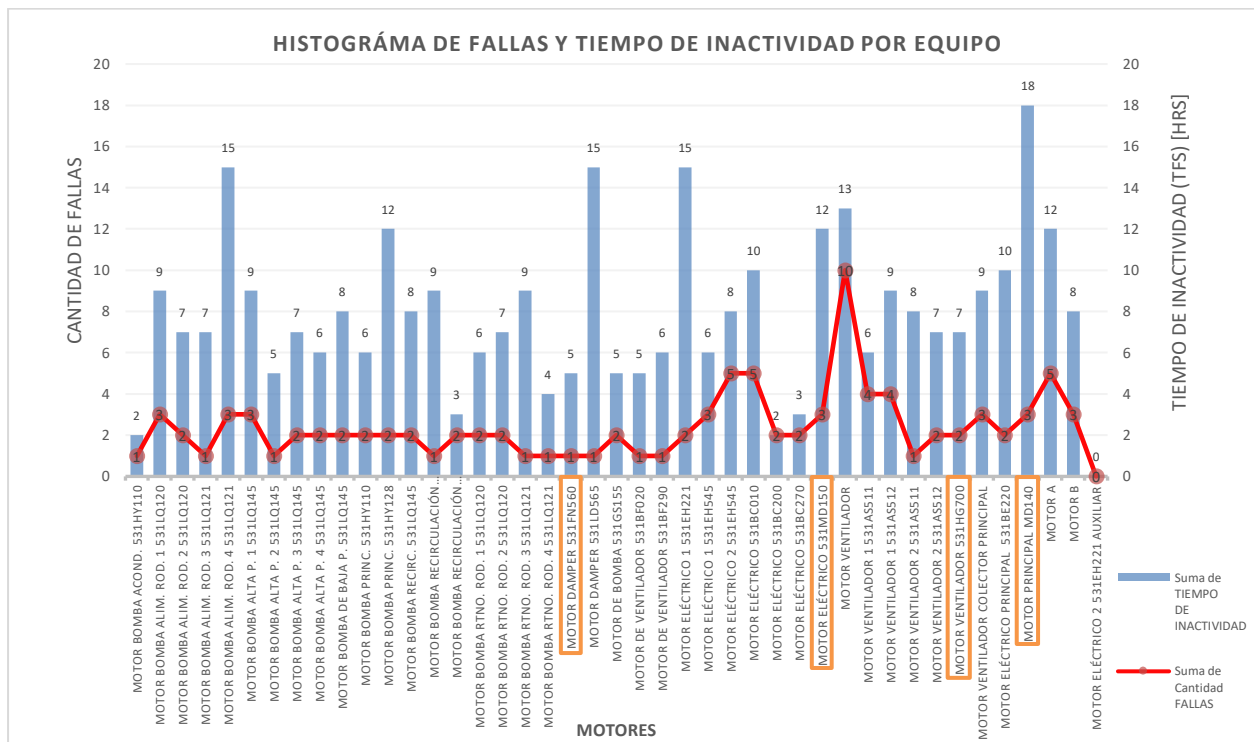
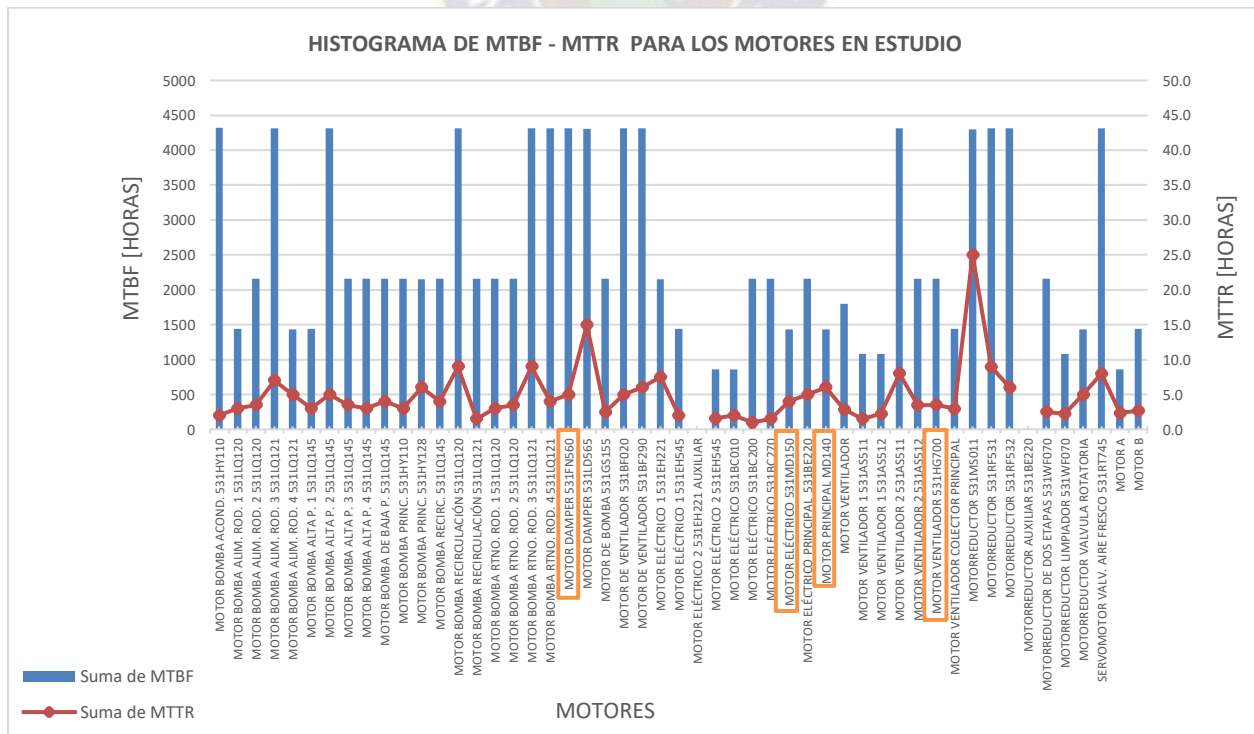


Gráfico 4.24 Histograma MTBF y MTRR para los motores en estudio



Fuente. Elaboración propia.

CAPÍTULO 5 - CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones Generales

En la industria actual, la eficiencia y la confiabilidad son cruciales. Los motores eléctricos de inducción desempeñan un papel fundamental en la productividad, pero los métodos de mantenimiento tradicionales a menudo no detectan problemas a tiempo, lo que resulta en costosos tiempos de inactividad. El Mantenimiento Predictivo surge como una solución innovadora que complementa otros tipos de mantenimiento y mejora su eficiencia.

5.2 Conclusiones específicas sobre el proyecto

- **Conocimiento Esencial:** Un profundo conocimiento de nuestros equipos, en particular, los motores eléctricos de inducción, es esencial para interpretar sus estados de funcionamiento y prever posibles fallas.
- **Determinación del origen de las fallas (Análisis Causa-Raíz):** Identificar claramente el origen de las fallas y los factores que afectan la vida útil de los motores es crucial para prevenir problemas futuros.
- **Técnicas efectivas:** Técnicas como el análisis de vibraciones y la termografía, cuando se aplican con precisión, contribuyen significativamente a la confiabilidad y vida útil de los motores.
- **Datos y Tendencias:** La recopilación y el análisis de datos son esenciales para respaldar decisiones fundamentadas y mejorar la confiabilidad de los motores.
- **Implementación Guiada:** Aunque no se presenta una implementación completa, se proporciona una guía sólida para abordar el Mantenimiento Predictivo.
- **Mejora Continua:** El Mantenimiento Predictivo es un proceso en constante evolución que busca optimizar estrategias y técnicas.

5.3 Conclusiones sobre la Aplicación del Proyecto

- **Evaluación de Datos:** habiendo realizado nuestra implementación parcial, se llevó a cabo una comparación de datos recopilados entre los periodos 2018-2019 y 2022-2023, lo que proporciona una visión inicial de la evolución de los motores y sus tendencias.

- **Priorización de Motores Críticos:** La identificación y agrupación de motores críticos según su criticidad es esencial para priorizar el enfoque del Mantenimiento Predictivo en los motores que tienen un impacto significativo en la producción.
- **Evolución de las Vibraciones Globales:** Se observó la evolución de las vibraciones globales a lo largo del tiempo, lo que no solo revela el estado de los motores sino también las tendencias en su comportamiento, proporcionando información valiosa para la toma de decisiones preventivas.
- **Termografía y Comportamiento Térmico:** La obtención de datos de termografía mostró claramente el comportamiento térmico de los motores, y su análisis estadístico o de tendencias nos proporciona información crucial para el mantenimiento.
- **Pruebas Estáticas:** Aunque las pruebas estáticas se aplican principalmente en motores de gran envergadura, son esenciales para garantizar la confiabilidad del aislamiento del motor.
- **Indicadores Clave:** La gestión adecuada de indicadores como el MTBF y el MTTR es crítica para evaluar la eficiencia del Mantenimiento Predictivo y mejorar la confiabilidad de los motores.

5.4 Recomendaciones

- **Implementación de Sistemas de Adquisición de Datos Avanzados:** Es esencial implementar sistemas de adquisición de datos que se ajusten a las necesidades específicas de la planta industrial y garantizar la calidad de los datos registrados en las técnicas de Mantenimiento Predictivo. Esto mejorará significativamente la eficiencia y la confiabilidad del PdM.
- **Fortalecimiento del Conocimiento Técnico:** Promover la capacitación y el desarrollo de un conocimiento profundo sobre equipos industriales y técnicas específicas, como la termografía y el análisis de vibraciones, para garantizar una interpretación precisa de los datos y una aplicación efectiva del Mantenimiento Predictivo.

Esperamos que este proyecto abra nuevas áreas de interés hacia los lectores, y que la comprensión y aplicación de los temas desarrollados, sean un punto de partida para abordar nuevos temas de investigación y mejora en el área de la ingeniería eléctrica.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] I. Markets, Ed., *Gestión Integral del Mantenimiento Industrial*. 2017.
- [2] S. Garcia Garrillo, *Organizacion y Gestion Integral del Mantenimiento*. 2003.
- [3] F. J. Gonzales Fernandez, *Teoria y Practica del Mantenimiento Industrial Avanzado*, 2da Edició. .
- [4] M. Teddy, *Planificación y Gestión del Mantenimineto Industrial*. .
- [5] T. Wreman, *Developing Performance Indicator For Managing Maintenance*, 1st ed. 1998.
- [6] E. T. Newbrough, “Administración del Mantenimiento Industrial.”
- [7] C. técnico AEN/ctn, “Norma EN 13306 - Terminología del Mantenimiento,” 2001.
- [8] “Sistema de Gestión deMantenimiento, Norma NB12017.” 2013.
- [9] T. J. Matos Q. and J. J. Torres, “Diseño e Implantación de Programas de Mantenimiento Usando Técnicas de Confiabilidad Operacional Mediante la Administración del SAP.” 2004.
- [10] Muñoz Abella Belén, *Mantenimiento Industrial*. .
- [11] J. G. Cecilia, “Aplicación de nuevas técnicas de mantenimiento en un parque de maquinaria en un grupo de cimentación,” 2009.
- [12] François Monchy, “Teoría y Práctica del Mantenimiento Industrial,” 1990.
- [13] C. Perez Jaramillo, “El Camino hacia el RCM.” <https://reliabilityweb.com/sp/articles/entry/otras-versiones-de-rcm>.
- [14] E. R. López, Campos Omar ; Tolentino, Eslava Guilibaldo ; Toledo, Velázquez Miguel ; Tolentino, “Metodología de mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) considerando taxonomía de equipos, base de datos y criticidad de efectos,” 2019.
<https://www.redalyc.org/jatsRepo/614/61458265006/html/index.html>.
- [15] D. E. Consultancy, *Best Practice Manual Electric Motors*. 2006.
- [16] WEG Motores, *Manual de Motores Electricos WEG*. .
- [17] U. C. EJ Moyer, “Basics on elecgric motors,” 2010.
- [18] ABB, “Cuaderno de aplicaciones técnicas 6. El motor asíncrono trifásico,” .
- [19] SFK, “Rodamientos y sellos en motores eléctricos y generadores.”
- [20] SFK, “Rodamientos,” 2019.
- [21] motores electricos CEMER, “Motores asíncronos trifásicos.”
- [22] WEG, “Guía Práctica de capacitación técnico / comercial - Motor eléctrico modulo I.” .
- [23] U. M. WEG, “Motor Eléctrico - Guía de Espesificación.”
- [24] L. A. Tavares, *Administración Moderna del Mantenimiento*. .
- [25] F. R. de E.- BUN-CA, “Manual Técnico de Motores Eléctricos,” 2011.
- [26] C. E. Pineda, “Confiabilidad en motores Eléctricos,” 2020. <https://transequipos.com/confiabilidad->

en-motores-electricos-diagnostico-a-sus-zonas-de-falla-2/.

- [27] K. Tian, T. Zhang, Y. Ai, and W. Zhang, "Induction Motor Dynamic Eccentricity Fault Diagnosis Based on the Combined Use of WPD and EMD-Simulation Study," 2018.
- [28] RSpro, "Termoresistencias RTD - guía de selección." .
- [29] SKF, "SKF Vibration Sensors Catalog." 2008.
- [30] Pruftechnik, "Un sensor, innumerables ventajas," 2014.
<https://pruftechnik.wordpress.com/2014/02/19/un-sensor-innumerables-ventajas-2/>.
- [31] R. Keith Mobley, *An Introduction to Predictive Maintenance*, Second Edi. 2002.
- [32] F. Ballesteros, "La Estrategia Predictiva en el Mantenimiento," 2018, [Online]. Available: <https://www.reporteroindustrial.com/temas/La-estrategia-predictiva-en-el-mantenimiento-40+127360>.
- [33] Bjorn Kange and S. Lundell, *Evaluation of the Potencial for Predictive Maintenance*. 2015.
- [34] "IEEE - Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery." 2000.
- [35] B. I. Company and S. G. Company, "SKF Static Motor Analyzer Baker DX," 2013.
- [36] I. P. E. Society, "IEEE Std 95-2000, Recommended Practice for Insulation Testing of AC Electric Machinery (2300 V and Above) With High Direct Voltage," 2002.
- [37] I. P. E. Society, "IEEE std522 - Guide for Testing Turn to Turn Insulation on Form-Wound Stator Coils for Alternating-Current Rotating Electric Machines," 1992.
- [38] Sicma21, "Mantenimiento Predictivo: Técnicas de monitoreo del Estado," 2021.
<https://www.sicma21.com/tecnicas-de-monitoreo-del-estado/>.
- [39] G. Pardo and H. Toro, "Protocolos de Comunicación Industrial."
- [40] Micro-Automación, "Automatización y Control," 2021.
<https://co.microautomacion.com/es/tec/comando-bimanual-2/>.
- [41] M. Gandhi, "Protocolos de Comunicación Industrial," 2022, [Online]. Available: <https://www.autycom.com/protocolos-de-comunicacion-industrial/>.
- [42] Meinsa, "La Automatización Industrial y los Sistemas de Redes de Comunicación," 2021, [Online]. Available: <https://meinsa.com/2021/07/automatizacion-industrial-sistemas-comunicacion/>.
- [43] D. Chacon, O. Dijort, and J. Castrillo, *Supervisión y Control de Procesos*. 2021.
- [44] T. R. Kuphaldt, *Lessons Industrial Instrumentation*. 2018.

GLOSARIO

Activo. Todo elemento que puede considerarse contable. En el ámbito del mantenimiento industrial, se consideran activos a todos los equipos, maquinaria, instalaciones y recursos utilizados en una planta o proceso de producción. Estos activos son fundamentales para el funcionamiento de la empresa y su capacidad para generar productos o servicios.

Confiabilidad Es la probabilidad de que un activo cumpla una función específica (no falle) bajo condiciones de operación determinadas en un período de tiempo específico.

Control Predictivo de Mantenimiento. Entendemos por Control Predictivo de Mantenimiento en un equipo, a la determinación del punto óptimo para la ejecución del mantenimiento preventivo.

Criticidad Es una medida del riesgo asociado a la falla de un activo, el cual se expresa como el producto de la frecuencia de ocurrencia de la falla o índice de probabilidad de falla y su consecuencia.

Desempeño. En el contexto de motores eléctricos y mantenimiento, "desempeño" se refiere al rendimiento global y la eficiencia de un motor eléctrico en su función específica. Este término abarca aspectos como la potencia, la eficiencia energética, la confiabilidad y la capacidad de operación continua de un motor. El análisis del desempeño de un motor eléctrico implica evaluar su comportamiento térmico, mecánico y eléctrico, con el objetivo de garantizar su operación óptima y prevenir problemas futuros. La monitorización y el mantenimiento periódico son prácticas comunes para mantener y mejorar el desempeño de los motores eléctricos en aplicaciones industriales.

Disponibilidad Es la probabilidad de que un activo esté en capacidad de cumplir su función específica en un momento dado bajo condiciones determinadas.

Eficacia. Grado en que se realizan las actividades planificadas y se alcanza los resultados planificados.

Eficiencia. Relación entre los resultados alcanzados y los recursos utilizados.

Elemento. Cualquier parte, componente, dispositivo, subsistema, unidad funcional, equipo o sistema que pueda considerarse individualmente.

Falla crítica. Falla de una unidad de equipo que origina un cese inmediato de la capacidad de realizar su función.

Fallo potencial. Es una falla en desarrollo y si no se hace nada para eliminarla se convertirá en avería. Es conocido como fallo potencial a un estado físico, el cual se puede ser identificable y se puede tomar medidas preventivas para evitar que se convierta en una falla real

Fase de falla temprana (falla prematura): En esta fase inicial, la tasa de fallas es alta. Se producen fallas debido a defectos de fabricación, diseño inadecuado o errores de instalación. Estas fallas tempranas ocurren en la etapa inicial de la vida útil del equipo y generalmente se caracterizan por una tasa de fallas alta pero constante.

Fase de vida útil normal. Después de la fase de falla temprana, la tasa de fallas disminuye y se mantiene relativamente constante durante un período de tiempo. Esta fase se conoce como la vida útil normal del equipo. Durante esta etapa, la tasa de fallas es baja y se mantiene estable dentro de un rango predecible.

Fase de desgaste y falla final. A medida que el equipo envejece y se acerca al final de su vida útil, la tasa de fallas comienza a aumentar nuevamente. Esto se debe al desgaste acumulado, el deterioro de los componentes y la degradación general del sistema. En esta fase, la tasa de fallas aumenta rápidamente, lo que indica un mayor riesgo de fallas críticas y una disminución en la confiabilidad del equipo.

Fiable. Que inspira confianza y seguridad.

Fiabilidad. Cualidad de fiable. Probabilidad de que un sistema, aparato o dispositivo cumpla una determinada función bajo ciertas condiciones durante un tiempo determinado.

Funcionalidad. es la característica más importante de todo sistema y está relacionada con su capacidad inherente para desempeñar una función específica.

Funcionabilidad. como mecanismo de unión de estos tres aspectos (funcionalidad, prestaciones y condiciones operativas), definiéndolo como: La capacidad inherente de un ítem para desempeñar una función requerida con unas prestaciones concretas, cuando es utilizado según se especifica.

Grado de excentricidad. Es una medida que se utiliza para evaluar la desviación del centro geométrico de un rotor con respecto al centro de rotación en un motor eléctrico. Esta excentricidad puede ser causada por varios factores, como errores de fabricación, desgaste, deformaciones o desalineaciones.

Ecuación
$$\varepsilon = \frac{\delta}{\delta_0}$$

Donde: δ es el desplazamiento del eje del rotor respecto al centro geométrico del estator.

δ_0 es el ancho medio del entrehierro.

Para que no existan rozas entre el rotor y el estator se debe cumplir que: $\delta < \delta_0$.

Indicador. Es la expresión cuantitativa o cualitativa del comportamiento y desempeño de un proceso, cuya magnitud al ser comparada con algún nivel de referencia permite señalar el cumplimiento de un objetivo previamente establecido por la organización, alertando sobre la existencia de un problema con el fin de tomar medidas correctivas o preventivas para solucionarlo, una vez se hayan determinado las causas que lo generaron.

Modo de Falla. Es la manera en la cual se manifiesta una falla.

Parámetro. En el ámbito de motores eléctricos y mantenimiento, un "parámetro" se refiere a una característica o medida específica que se utiliza para evaluar el estado, el rendimiento y la integridad de un motor eléctrico. Estos parámetros son fundamentales para el monitoreo y la gestión eficaz de los motores eléctricos, y pueden incluir mediciones como la temperatura, la vibración, la corriente eléctrica, la tensión, la resistencia de aislamiento y otros indicadores clave que ayudan a prevenir problemas y mantener la operación óptima de los equipos. El seguimiento regular de estos parámetros es esencial para garantizar la fiabilidad y la eficiencia de los motores eléctricos industriales.

Proceso. Es una secuencia, u orden definido de actividades químicas, físicas, o biológicas que se llevan a cabo para la conversión, transporte o almacenamiento de material o energía.

Redición. Referido a la repetición de lo que se dijo o lo que se ha hecho.

Riesgo. El riesgo en mantenimiento industrial se refiere a la medida de la incertidumbre en torno a la operación y el mantenimiento de equipos y sistemas industriales. Incluye la evaluación de posibles eventos negativos, como fallas inesperadas, accidentes, interrupciones no planificadas y otros incidentes que podrían tener impactos adversos en la seguridad, la eficiencia operativa y la rentabilidad de las operaciones industriales. Se estima mediante el producto de la probabilidad de falla y su consecuencia.

$$R(t) = Pf(t) \times C$$

R(t): riesgo

Pf(t): probabilidad de ocurrencia de un evento no deseado

C: consecuencias.

Sistema de mantenimiento. Conjunto de sistemas interrelacionados que tiene como propósito la preservación de los objetos, los entornos de trabajo y las instalaciones durante su ciclo de vida.

Software de la aplicación. Software específico para una aplicación de usuario que es configurable y, en general, contiene secuencias lógicas, expresiones permisivas y límite, algoritmos de control y otros códigos necesarios para controlar entrada, salida, cálculos y decisiones; véase también software.

Sobrecarga. Es el aumento de la intensidad de corriente del motor por encima de su magnitud nominal, las cuales pueden ser de corta o larga duración.

ANEXOS

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A. COMPLEMENTOS PARA EL ANÁLISIS DE VIBRACIONES

1. Transformada rápida de Fourier para el análisis espectral de vibraciones.
2. Valores de vibraciones según ISO 10816 – 3 en valores de velocidad y desplazamiento.
3. Norma para el análisis de vibraciones en máquinas eléctricas cuando están fuera de servicio (luego del mantenimiento).
4. Tabla de Charlotte relacionado a posibles fallas en motores eléctricos de induccion mediante del analsis de espectros.

ANEXO B. PRUEBAS ESTÁTICAS

1. Voltajes de prueba en HiPot según std. EASA/AR100
2. Ejemplo de prueba típica de HiPot en Escalón

ANEXO C. DIRECCIONÁNDONOS AL MANTENIMIENTO PREDICTIVO

1. Metodología de implementación
2. Flujograma para direccionarnos al PdM

ANEXO D. DATOS DEL ANÁLISIS DE CRITICIDAD

1. Resumen de análisis de criticidad de motores del programa elaborado
2. Datos generales de motores eléctricos en estudio

ANEXO E. FICHAS TÉCNICAS

1. MOTOR 1 - 531.MD140M01
2. MOTOR 2 - 531.MD150M01

ANEXO F. CÓDIGO REALIZADO EN PYTHON PAR EL ANÁLISIS DE VIBRACIONES GLOBALES

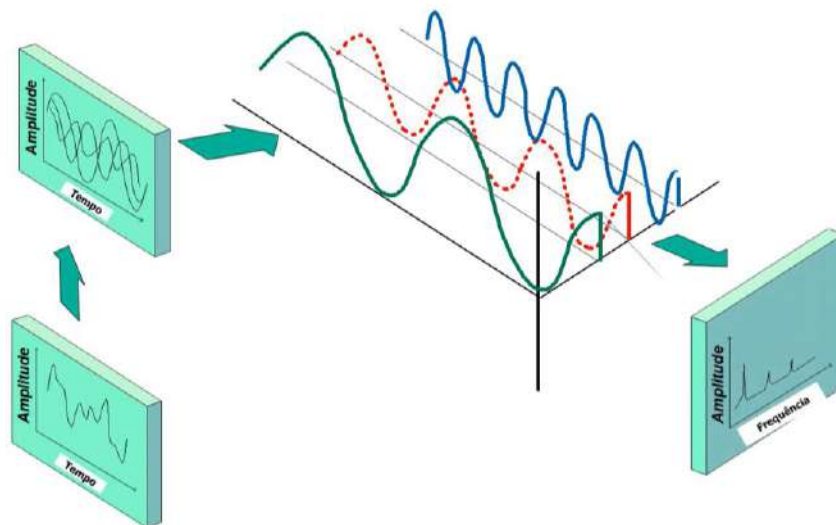
ANEXO G. CÓDIGO REALIZADO EN PYTHON PAR EL ANÁLISIS DE TERMOGRAFÍA

A. COMPLEMENTOS PARA EL ANÁLISIS DE VIBRACIONES

A1. Transformada rápida de Fourier para el análisis espectral de vibraciones.

El análisis espectral de vibraciones es una técnica utilizada para descomponer una señal de vibración compleja en sus componentes de frecuencia individuales. Esto permite comprender mejor las diferentes contribuciones de frecuencia en una señal de vibración y detectar posibles problemas o patrones en un sistema.

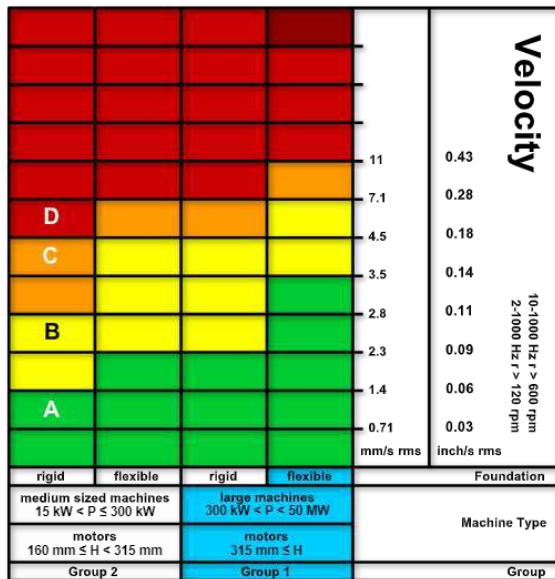
Matemáticamente, el análisis espectral se realiza mediante la Transformada de Fourier, que toma una señal en el dominio del tiempo y la descompone en una serie de componentes sinusoidales en el dominio de la frecuencia. Esta descomposición se presenta en un gráfico llamado "espectro de frecuencia", que muestra la amplitud de cada componente de frecuencia presente en la señal.



Fuente: Acima, diseño esquemático representativo de la FFT (HP Agilent, 1995)

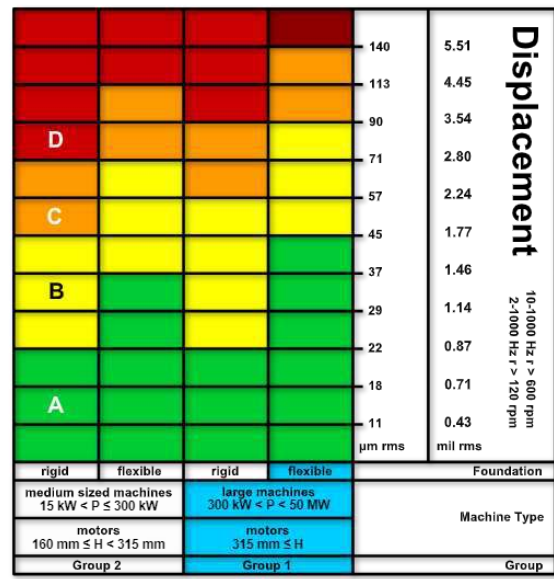
El análisis espectral es una herramienta poderosa en el diagnóstico de problemas en maquinaria y sistemas, permitiendo una comprensión detallada de las características de las vibraciones y su relación con el comportamiento del sistema. Este tema debe ser estudiado ampliamente para su comprensión y aplicación en el mantenimiento predictivo.

A2. Valores de vibraciones según ISO 10816 – 3 en valores de velocidad y desplazamiento.



A New machine condition **C** Short-term operation allowable
B Unlimited long-term operation allowable **D** Vibration causes damage

© Mobius 2018 www.mobiusinstitute.com UNIT



A New machine condition **C** Short-term operation allowable
B Unlimited long-term operation allowable **D** Vibration causes damage

© Mobius 2018 www.mobiusinstitute.com UNIT

Fuente: <https://www.mobiusinstitute.com/calculators-simulations-severity-charts/>

A3. Norma para el análisis de vibraciones en máquinas eléctricas cuando están fuera de servicio IEC 60034-14 (luego del mantenimiento).

Recomendable para realizar pruebas de vibraciones cuando el motor acaba de salir de un mantenimiento, a diferencia de la norma ISO10816 -3 que se utiliza en motores en operación.

Norma IEC 60034-14

NORME INTERNATIONALE
INTERNATIONAL STANDARD

CEI IEC
60034-14
Tenth edition
Third edition
2003-11

Machines électriques tournantes -
Partie 14:
Vibrations mécaniques de certaines machines de hauteur d'axe supérieure ou égale à 56 mm -
Mesurage, évaluation et limites de l'intensité vibratoire

Table 1 – Limits of maximum vibration magnitude in displacement, velocity and acceleration (r.m.s.) for shaft height H

Vibration grade	Shaft height, mm	$56 \leq H \leq 132$			$132 < H \leq 280$			$H > 280$		
		Displac. µm	Vel. mm/s	Acc. m/s^2	Displac. µm	Vel. mm/s	Acc. m/s^2	Displac. µm	Vel. mm/s	Acc. m/s^2
A	Free suspension	25	1,8	2,5	35	2,2	3,5	45	2,8	4,4
	Rigid mounting	21	1,3	2,0	29	1,8	2,8	37	2,3	3,6
B	Free suspension	11	0,7	1,1	18	1,1	1,7	29	1,8	2,8
	Rigid mounting	-	-	-	14	0,9	1,4	24	1,5	2,4

Grade "A" applies to machines with no special vibration requirements.
Grade "B" applies to machines with special vibration requirements. Rigid mounting is not considered acceptable for machines with shaft heights less than 132 mm.
The interface frequencies for displacement/velocity and velocity/acceleration are 10 Hz and 250 Hz respectively.

Fuente: Norma IEC 60034-14 – Maquinas Eléctricas Rotatorias

Cuando vamos hacer evaluaciones luego de la reconstrucción del motor si o si es necesario realizar un analisis espectral de vibraciones (es decir que podamos ver ele espectro de vibraciones) ya que con un valor global no se puede diagnosticar ningun tipo de problema que se detalla en las tablas de charlotte.

A4. Tabla de Charlotte relacionado a posibles fallas en motores eléctricos de induccion mediante del analisis de espectros.

FUENTE DEL PROBLEMA	ESPECTRO TÍPICO	OBSERVACIONES
MOTORES DE INDUCCIÓN AC A. EXCENTRICIDAD DEL ESTATOR, LAMINACIÓN EN CORTOCIRCUITO O ESTATOR SUELTO	LINEA FFT 3200 RADIAL 	Los problemas en el estator generan una alta vibración a 2X la frecuencia de la línea eléctrica (2F _L). La excentricidad del estator produce un entremuerto irregular estacionario entre el rotor y el estator, lo cual produce una vibración muy direccional. El entremuerto no debe exceder más del 5% para motores de inducción y el 10% para motores sincrónicos. Las patas suaves y las bases torcidas pueden dar como resultado un estator excentrico. El estator suelto a su cercza se debe a una holgura o debilidad en el soporte del estator. Las laminaciones del estator con cortocircuito pueden causar un calentamiento irregular, el cual puede distorsionar al estator en si. Esto produce una vibración inducida por efectos térmicos que puede incrementarse significativamente con el tiempo de operación, causando una distorsión en el estator y problemas en el entremuerto.
B. ROTOR EXCENTRICO (Entremuerto variable giratorio) F _L = Frec. de línea eléctrica N _s = Velocidad sincrona = 120 FL / P F _d = Frec. de deslizamiento = N _s - RPM F _p = Frec. del paso de polos = Fc X P P = # de Polos	LINEA FFT 3200 BANDAS LATERALES F _p ALREDEDOR DE 2FL 	El rotor excentrico produce un entremuerto variable entre el rotor y el estator, lo cual produce una vibración pulcario (normalmente entre 2F _L y la armónica de velocidad de giro más cercana). Por lo regular se requiere un espectro de "zoom" para separar 2F _L y la armónica de velocidad de giro. Los rotores excentricos generan 2F _L rodeados por bandas laterales de frecuencia de Paso de Polos (F _p), así como por bandas laterales de F _p que se encuentran alrededor de la velocidad de giro. F _p aparece por sí misma a una frecuencia baja (Frecuencia de Paso de Pole = Frecuencia de Deslizamiento X # de Polos). Los valores comunes de F _p oscilan entre 20 y 120 CPM (0.3 - 2.0 Hz). Una pata suave o un desalineamiento provoca a menudo un entremuerto variable debido flexiones mecánicas (de hecho, es un problema mecánico, no eléctrico).
C. PROBLEMAS EN EL ROTOR Estator Barras del Rotor Rotor Motor de 2 Polos Entremuerto Conductores Campo Magnético	LINEA FFT 3200 RADIAL BANDAS LATERALES F _p ALREDEDOR DE LAS ARMÓNICAS DE VELOCIDAD DE GIRO 	Las barras del rotor Rotas o agrietadas o anillos de corto circuito rotos o agrietados; uniones en mal estado entre las barras del rotor y los anillos de cortocircuito; o laminaciones del rotor en cortocircuito, produciendo una alta vibración de velocidad de giro en 1X con bandas laterales de frecuencia del paso de polos (F _p). Además estos problemas a menudo generarán que las bandas laterales F _p estén atreedor de la segunda, tercera, cuarta y quinta armónica de velocidad de giro. Las barras del rotor abietas o sueltas se indican mediante bandas laterales de frecuencia de línea 2X (2F _L) que rodean la frecuencia de paso de las barras del rotor (RBPF) y/o su armónica (RBPF = número de barras X RPM). A menudo causará niveles altos en 2X RBPF, con sólo una pequeña amplitud en 1X RBPF. La producción de chispas eléctricamente inducidas entre las barras sueltas del rotor y los anillos de sujeción mostrarán niveles altos en 2X RBPF (con bandas laterales 2F _L); pero sin incremento o con un incremento muy pequeño en las amplitudes de 1X RBPF.
D. PROBLEMAS DE FASE (Conector suelto)	RADIAL 	Los problemas de fase debido a conectores sueltos o rotes pueden causar una vibración excesiva en la frecuencia de línea de 2X (2F _L), la cual presentará bandas laterales alrededor de ésta, con un espaciado de 1/3 de la frecuencia de línea (1/3 F _L). Los niveles en 2F _L pueden exceder 1.0 pulg./seg. si no se corrigen. Éste es un problema en particular si el conector defectuoso sólo hace un contacto esporádico. Los conectores sueltos o partidos se deben reparar para prevenir un daño mayor.
DESALINEACIÓN A. DESALINEACIÓN ANGULAR	AXIAL 	La Desalineación Angular se caracteriza por una vibración axial alta, 180° fuera de fase a través del acoplamiento. Tendrá una vibración axial alta tanto en 1X como en 2X RPM. Sin embargo, no es inusual que 1X, 2X ó 3X dominen. Estos síntomas también pueden indicar problemas de acoplamiento. Una desalineación angular severa puede presentar muchas armónicas de 1X RPM. A diferencia de la Holgura Mecánica del Tipo 3, estas armónicas múltiples no cuentan con un piso de ruido elevado en los espectros.
B. DESALINEACIÓN PARALELA	RADIAL 	La Desalineación Paralela tiene características de vibración similares a la Desalineación Angular pero presenta una vibración radial alta que se aproxima a 180° fuera de fase a través del acoplamiento. Frecuentemente 2X es mayor que 1X, pero su altura relativa a 1X la impone el tipo de acoplamiento. Cuando la Desalineación Angular o Radial es severa, pueden generar picos de amplitud altos en armónicas mucho más altas (4X - 8X), o incluso toda una serie de armónicas de alta frecuencia similares en apariencia a la holgura mecánica. El tipo de acoplamiento y el material con frecuencia influyen enormemente en el espectro total cuando la desalineación es severa. Generalmente no presenta piso de ruido elevado.
C. RODAMIENTO DESALINEADO INCLINADO EN EL EJE	FASE 1 2:00 2 5:00 3 8:00 4 11:00 	El Rodamiento Inclinado generará una vibración axial considerable. Causará un Movimiento Torcido con un cambio de fase de aprox. 180° entre la parte superior e inferior, izquierda y derecha de la caja que soporta el rodamiento. El tratar de alinear el acoplamiento o equilibrar el rotor no solucionará el problema. Por lo general se debe retirar el rodamiento e instalarse correctamente.

Fuente: Technical Associates Charlottes

ANEXO B. PRUEBAS ESTÁTICAS

B.1 Voltaje de prueba en HiPot según std. EASA/AR100

**Table 4-4. HIGH-POTENTIAL TEST USING AC
NEW WINDINGS**

DESCRIPTION OF MACHINE	EFFECTIVE AC HIGH-POTENTIAL TEST VOLTAGE	
	STATOR WINDING	ROTOR WINDING
AC INDUCTION MACHINES AND NONEXCITED SYNCHRONOUS MACHINES		
Motors rated 0.5 hp and less, generators rated 373 watts (or equivalent) and less, and for operation on circuits:	1000 volts	1000 volts + 2 times the secondary voltage
a) 250 volts or less		
b) Above 250 volts	1000 volts + 2 times the rated voltage of the machine	
Motors rated greater than 0.5 hp, generators rated greater than 373 watts (or equivalent), and for:		
a) Non-reversing duty		
b) Reversing duty		1000 volts + 4 times the secondary voltage

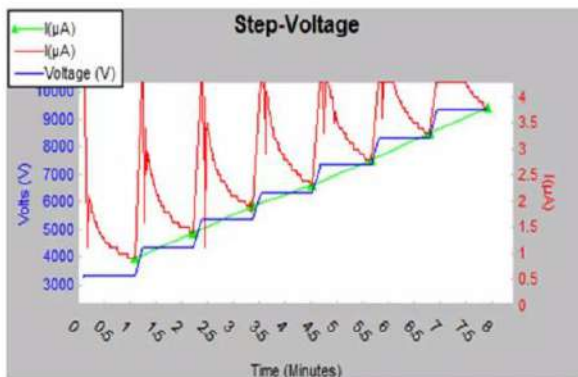
**Table 4-5. HIGH-POTENTIAL TEST USING DC
NEW WINDINGS**

DESCRIPTION OF MACHINE	DC HIGH-POTENTIAL TEST VOLTAGE	
	STATOR WINDING	ROTOR WINDING
AC INDUCTION MACHINES AND NONEXCITED SYNCHRONOUS MACHINES		
Motors rated 0.5 hp and less, generators rated 373 watts (or equivalent) and less, and for operation on circuits:	1700 volts	1700 volts + 3.4 times the secondary voltage
a) 250 volts or less		
b) Above 250 volts	1700 volts + 3.4 times the rated voltage of the machine	
Motors rated greater than 0.5 hp, generators rated greater than 373 watts (or equivalent), and for:		
a) Non-reversing duty		
b) Reversing duty		1700 volts + 6.8 times the secondary voltage

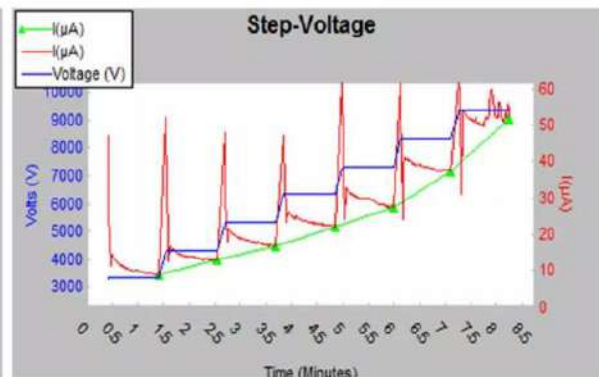
Fuente: Norma EASA, Standard AR100

B.2 Ejemplo de prueba típica de HiPot en Escalón

Aislamiento Estable:



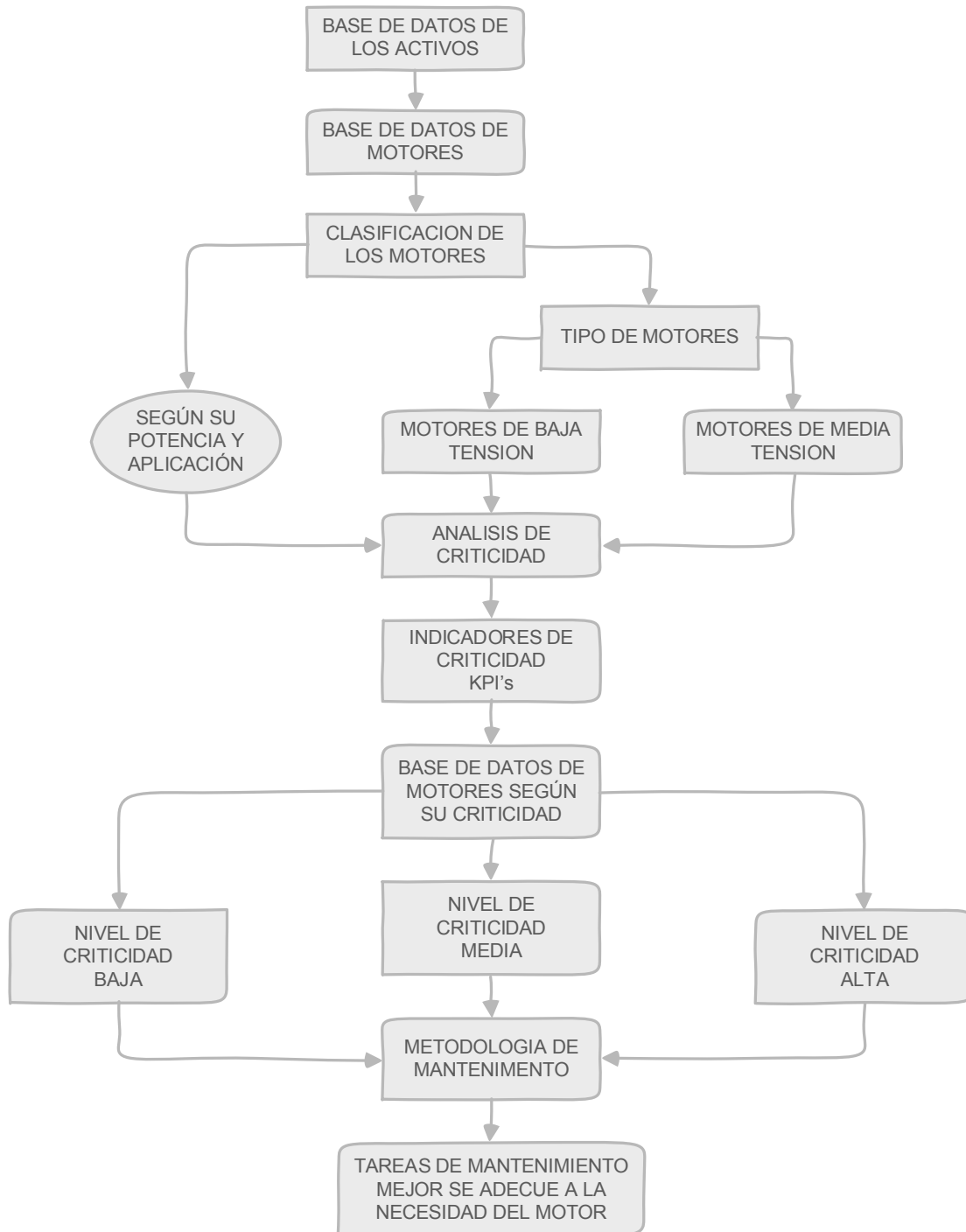
Aislamiento Inestable:



Fuente: Megger Baker Instruments

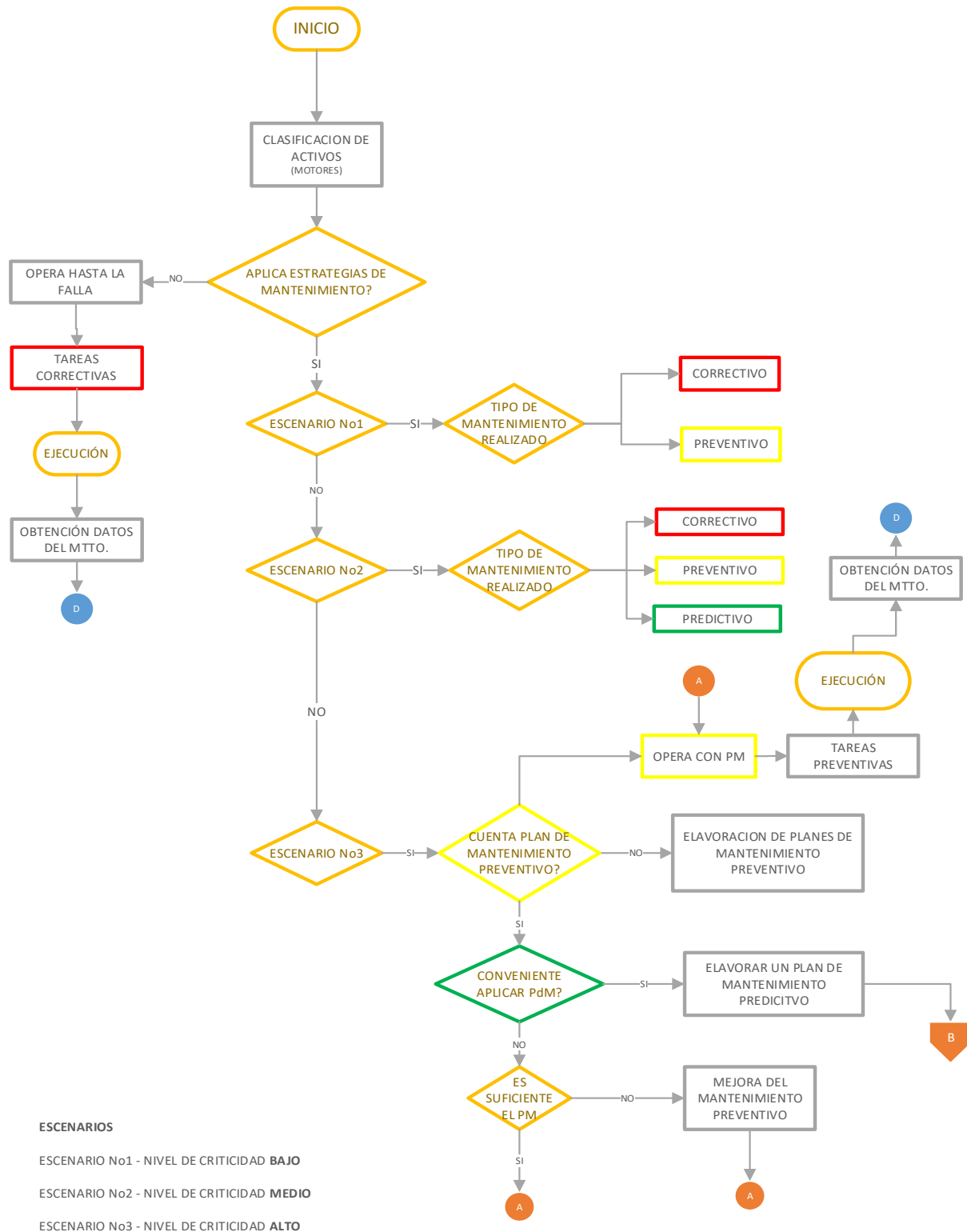
ANEXO C. DIRECCIONÁNDONOS AL MANTENIMIENTO PREDICTIVO

C1. Metodología para la aplicación del mantenimiento predictivo a motores eléctricos de inducción – clasificación de los activos.

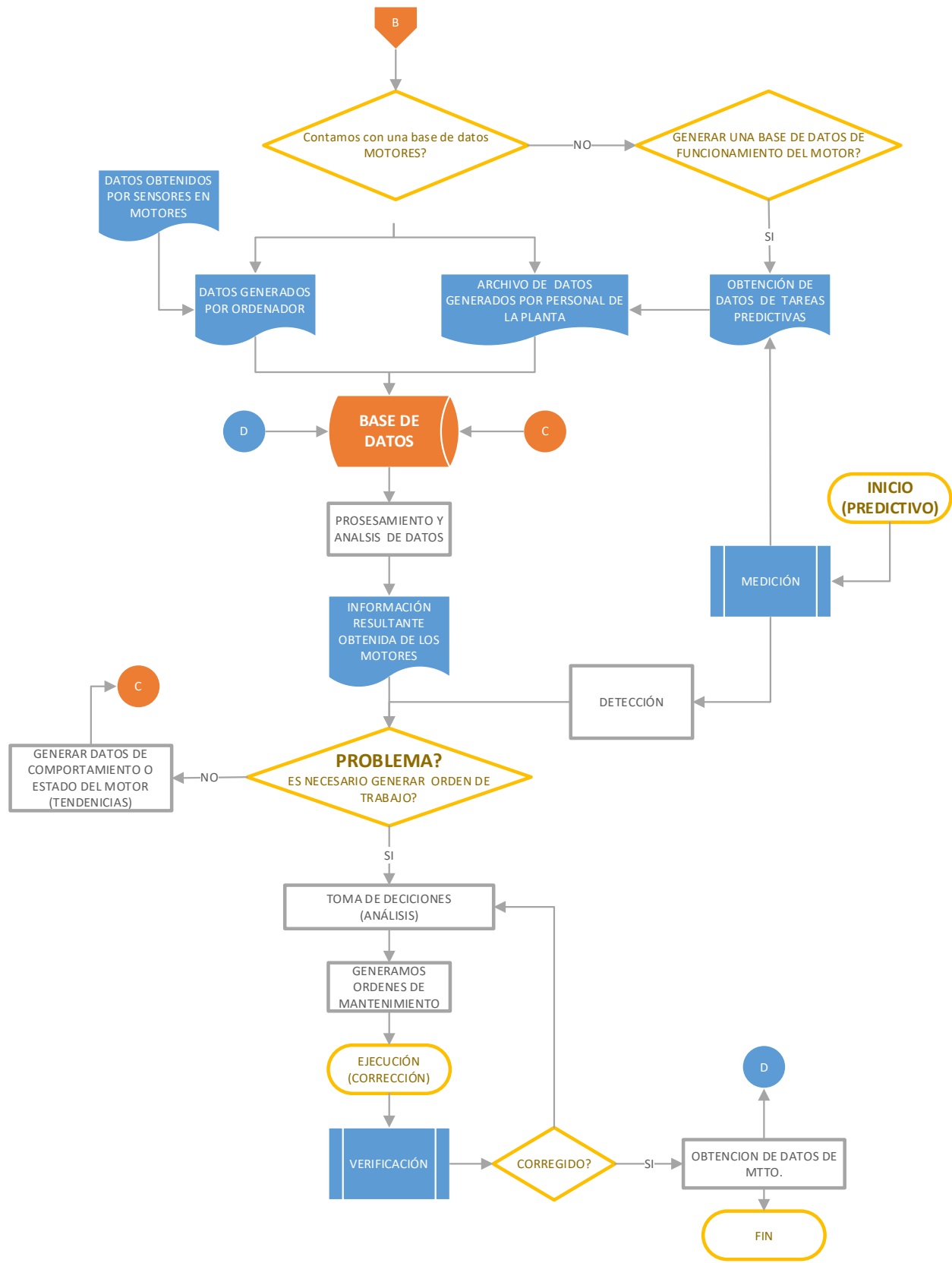


Fuente: Elaboración propia

C2. Flujograma para la elaboración de un mantenimiento predictivo (según su criticidad y tipo de mantenimiento).



Fuente: Elaboración propia



Fuente: Elaboración propia

ANEXO D. DATOS DEL ANÁLISIS DE CRITICIDAD

D.1 Resumen del análisis de criticidad del programa elaborado

ANÁLISIS DE CRITICIDAD DE EQUIPOS POR RIESGO

CLASIFICACION POR FRECUENCIA (F)

Frecuencia de Falla (F)	Fallas por periodo establecido	Valor de modelo
Pobre	>4	4
medio	3-4	3
Buena	1-2	2
Excelente	<1	1

CLASIFICACION POR FACTOR DE IMPACTO OPERACIONAL

Impacto Operacional (IO)	Consecuencias	Escala del Modelo
extremadamente Alta	Paro inmediato de la planta / area	10
Muy Alta	paro parcial de la planta / area	6
Alta	Impacto en los niveles de la producción o calidad	4
Medio	Costos de operación asociados con la indisponibilidad	2
Baja	Sin impacto significativo en operación	1

FACTOR DE FLEXIBILIDAD OPERACIONAL

Flexibilidad Operacional (FO)	Consecuencia	Escala del Modelo
Alto	Sin repuestos para alternativa de operación	4
Medio	Función envío de repuesto	2
Bajo	Función de repuesto disponible	1

COSTOS DE MANTENIMIENTO

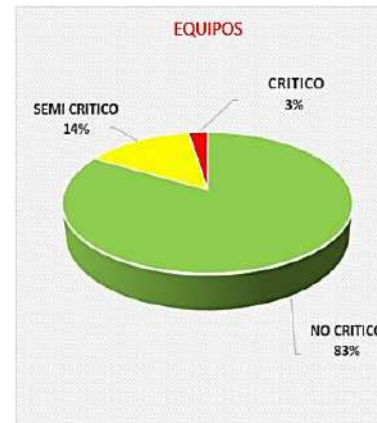
Costos de Mantenimiento (MC)	Consecuencia	Escala del Modelo
Alta	>= 10 000 \$us	2
Baja	< 10 000 \$us	1

IMPACTO EN LA SEGURIDAD Y MEDIO AMBIENTE

Impacto en la Seguridad y Medio Ambiente (ISE)	Consecuencias	Escala del Modelo
Extremadamente Alto	Impacto en la seguridad humana con requerimiento de notificación a institución pública	8
Muy alto	Afección irreverdible al medio Ambiente	6
Alto	Impacto en la operación de las instalaciones causando daños severos.	4
Medio	posibles Accidentes e incidentes en operación	2
Bajo	Afección al medioambiente sin la violación de leyes medioambientales, impacto en la operación	1
Muy bajo	Sin impacto humano, al medio Ambiente u operación de las instalaciones.	0

MATRIZ DE CRITICIDAD

Matriz de Criticidad por analisis de Riesgo					
FRECUENCIA	10	20	30	40	50
4	40	80	120	160	200
3	30	60	90	120	150
2	20	40	60	80	100
1	10	20	30	40	50
	CONSECUENCIA				



TIEMPO DE FUNCIONAMIENTO DE AREA MOLINDEA

FUNCIONAMIENTO	MESES (*)	HORAS - DIA	TOTAL HORAS
	6	24	4320.00
	VALORES MODIFICABLES		

(*) MESES DE FUNCIONAMIENTO PROGRAMADO ANTES DE UN OVER HALL

DATOS CRITICIDAD

MAXIMO	144
MINIMO	4
MEDIA	29.5

$$R = F \times C$$

R: Risk factor

F: Frequency

C: Consequence

CRITICIDAD NRO EQUIPOS

NO CRITICO	264
SEMI CRITICO	45
CRITICO	8
TOTAL EQUIPOS	317

$$C = (OI \times OF) + MC + ISE$$

OI: Operational Impact factor

OF: Operational Flexibility factor

MC: Maintenance Cost factor

NIVELES DE CRITICIDAD DE ACTIVOS

Nivel de Criticidad de Activos	Valores Adimensionales de Riesgo
Critico	R > 100
Semi-critico	40 < R < 100
No-critico	R < 40

Criterio de criticidad Extraido del libro: "The Maintenance Management Framework - Models and Methods for Complex Systems Maintenance"

Fuente: Elaboración propia

D.2. Datos generales para análisis de motores del área de molienda de cemento en estudio.

ITEM	Campo clasif. (Cod Ant)	Equipo	Denominación	HORAS PROGRAMADAS	Cantidad FALLAS	HORAS TRABAJO APRC	TIEMPO DE INACTIVIDAD	MTBF [Hrs]	MTRR [Hrs]	F (Frecuencia)	OI (Operational Impact)	OF (Operational Flexibility)	MC (Maintenance Cost)	ISE (Impact on Safety and Environmet)	C (Consequences)	Criticidad FxC
7	531255631	10002143	MOTORA	4320.00	5	4398.00	12.00	861.60	2.4	4	4	4	1	2	19	76
15	531253591	10002308	MOTORREDUCTOR VALVULA ROTATORIA	4320.00	3	4305.00	15.00	1435.00	5.0	3	4	4	1	4	21	63
17	531255631	10002311	MOTORVENTILADOR	4320.00	4	4312.00	8.00	1078.00	2.0	3	4	4	2	2	20	60
19	531255513	10002315	MOTORVENTILADOR	4320.00	6	4315.00	5.00	719.17	0.8	4	4	4	1	4	21	84
28	531435631	10002658	MOTOR B	4320.00	3	4312.00	8.00	1437.33	1.7	3	2	4	2	2	12	36
34	531EH221.M01	10009228	MOTOR ELÉCTRICO 1 531EH221	4320.00	2	4305.00	15.00	2152.50	7.5	2	1	1	1	8	10	20
35	531EH221.M02	10009229	MOTOR ELÉCTRICO 2 531EH221 AUXILIAR	4320.00	0	4320.00	0.00	#DIV/0!	#DIV/0!	1	1	1	1	8	10	10
43	531.F#022.M01	10009241	MOTOR DE VENTILADOR 531BF020	4320.00	1	4315.00	5.00	4315.00	5.0	2	4	4	1	2	19	58
51	531.BC010.M01	10009245	MOTOR ELÉCTRICO 531BC010	4320.00	5	4310.00	10.00	862.00	1.0	4	6	4	1	2	27	81
65	531.WF070.M01	10009253	MOTORREDUCTOR DE DOS ETAPAS 531WF070	4320.00	2	4315.00	5.00	2157.50	7.5	2	6	4	1	2	27	81
69	531.SX072.M01	10009257	MOTORREDUCTOR LIMPIADOR 531WF070	4320.00	4	4311.00	9.00	1077.75	1.8	3	2	1	1	1	6	18
84	531.BC270.M01	10009264	MOTOR ELÉCTRICO 531BC270	4320.00	2	4317.00	3.00	2158.50	1.5	2	6	1	2	0	8	16
103	531.BE220.M01	10009233	MOTOR ELÉCTRICO PRINCIPAL 531BE220	4320.00	2	4310.00	10.00	2155.00	5.0	2	2	4	1	4	13	26
107	531.BE220.M02	10009237	MOTORREDUCTOR AUXILIAR 531BE220	4320.00	0	4320.00	0.00	#DIV/0!	#DIV/0!	1	2	1	2	0	4	4
113	531.F#292.M01	10009272	MOTOR DE VENTILADOR 531BF290	4320.00	1	4314.00	6.00	4314.00	6.0	2	6	4	1	2	27	81
118	531.MS011.M01	10009275	MOTORREDUCTOR 531MS011	4320.00	1	4295.00	25.00	4295.00	25.0	2	2	2	1	1	6	12
124	531.BC200.M01	10009279	MOTOR ELÉCTRICO 531BC200	4320.00	2	4318.00	2.00	2159.00	1.0	2	6	2	1	4	17	34
129	531.MD140.M01	10008809	MOTOR PRINCIPAL MD140	4320.00	3	4302.00	18.00	1434.00	6.0	3	10	4	2	4	46	138
151	531.F#730.M01	10009304	MOTORVENTILADOR 531HG700	4320.00	2	4313.00	7.00	2156.50	3.5	2	10	4	2	6	48	96
156	531.TV570.M01	10009307	SERVOMOTOR VALV. AIRE FRESCO 531RT745	4320.00	1	4312.00	8.00	4312.00	8.0	2	6	4	1	0	25	50
2161	531.HY110.M01	10009310	MOTOR BOMBA PRINC. 531HY110	4320.00	2	4314.00	6.00	2157.00	3.0	2	6	4	1	0	25	50
104	531.HY110.M02	10009313	MOTOR BOMBA ACOND. 531HY110	4320.00	1	4318.00	2.00	4318.00	2.0	2	1	4	1	0	5	10
2181	531.LQ120.M01	10009326	MOTOR BOMBA ALIM. ROD. 1 531LQ120	4320.00	3	4311.00	9.00	1437.00	3.0	3	10	2	1	1	22	66
184	531.LQ120.M02	10009329	MOTOR BOMBA ALIM. ROD. 2 531LQ120	4320.00	2	4313.00	7.00	2156.50	3.5	2	10	4	1	1	42	84
187	531.LQ120.M03	10009332	MOTOR BOMBA RTNO. ROD. 1 531LQ120	4320.00	2	4314.00	6.00	2157.00	3.0	2	10	4	1	0	41	82
190	531.LQ120.M04	10009335	MOTOR BOMBA RTNO. ROD. 2 531LQ120	4320.00	2	4313.00	7.00	2156.50	3.5	2	10	4	1	0	41	82
193	531.LQ120.M05	10009338	MOTOR BOMBA RECIRCULACIÓN 531LQ120	4320.00	1	4311.00	9.00	4311.00	9.0	2	10	4	1	0	41	82
199	531.LQ121.M01	10009342	MOTOR BOMBA ALIM. ROD. 3 531LQ121	4320.00	1	4313.00	7.00	4313.00	7.0	2	10	4	1	0	41	82
202	531.LQ121.M02	10009345	MOTOR BOMBA ALIM. ROD. 4 531LQ121	4320.00	3	4305.00	15.00	1435.00	5.0	3	10	4	1	0	41	123
205	531.LQ121.M03	10009348	MOTOR BOMBA RTNO. ROD. 3 531LQ121	4320.00	1	4311.00	9.00	4311.00	9.0	2	10	4	1	0	41	82
208	531.LQ121.M04	10009351	MOTOR BOMBA RTNO. ROD. 4 531LQ121	4320.00	1	4316.00	4.00	4316.00	4.0	2	10	4	1	0	41	82
211	531.LQ121.M05	10009354	MOTOR BOMBA RECIRCULACIÓN 531LQ121	4320.00	2	4317.00	3.00	2158.50	1.5	2	10	4	1	0	41	82
217	531.LQ145.M01	10009358	MOTOR BOMBA DE BAJA P. 531LQ145	4320.00	2	4312.00	8.00	2156.00	4.0	2	10	4	1	0	41	82
220	531.LQ145.M02	10009361	MOTOR BOMBA ALTA P. 1 531LQ145	4320.00	3	4311.00	9.00	1437.00	3.0	3	10	4	1	0	41	123
223	531.LQ145.M03	10009364	MOTOR BOMBA ALTA P. 2 531LQ145	4320.00	1	4315.00	5.00	4315.00	5.0	2	10	4	1	0	41	82
226	531.LQ145.M04	10009367	MOTOR BOMBA ALTA P. 3 531LQ145	4320.00	2	4313.00	7.00	2156.50	3.5	2	10	4	1	0	41	82
229	531.LQ145.M05	10009370	MOTOR BOMBA ALTA P. 4 531LQ145	4320.00	2	4314.00	6.00	2157.00	3.0	2	10	4	1	0	41	82
232	531.LQ145.M06	10009373	MOTOR BOMBA RECIRC. 531LQ145	4320.00	2	4312.00	8.00	2156.00	4.0	2	10	4	1	4	45	90
239	531.MD150.M01	10009376	MOTOR ELÉCTRICO 531MD150 (531SR150)	4320.00	3	4308.00	12.00	1436.00	4.0	3	10	4	1	1	42	126
248	531.GS155.M01	10009381	MOTOR DE BOMBA 531GS155	4320.00	2	4315.00	5.00	2157.50	2.5	2	6	4	1	0	25	50
258	531.HY128.M01	10010057	MOTOR BOMBA PRINC. 531HY128	4320.00	2	4308.00	12.00	2154.00	6.0	2	6	4	1	0	25	50
262	531.EH545.M01	10009384	MOTOR ELÉCTRICO 1 531EH545	4320.00	3	4314.00	6.00	1438.00	2.0	3	1	4	1	0	5	15
263	531.EH545.M02	10009385	MOTOR ELÉCTRICO 2 531EH545	4320.00	5	4312.00	8.00	862.40	1.6	4	1	4	1	0	5	20
274	531.F#541.M01	10009392	MOTORVENTILADOR 1 531A5511	4320.00	4	4314.00	6.00	1078.50	1.5	3	10	4	2	6	48	144
277	531.F#543.M01	10009395	MOTORVENTILADOR 2 531A5511	4320.00	1	4312.00	8.00	4312.00	8.0	2	10	4	2	6	48	96
283	531.F#542.M01	10009399	MOTORVENTILADOR 1 531A5512	4320.00	4	4311.00	9.00	1077.75	2.3	3	10	4	2	6	48	144
286	531.F#544.M01	10009402	MOTORVENTILADOR 2 531A5512	4320.00	2	4313.00	7.00	2156.50	3.5	2	10	4	2	6	48	96
291	531.RF531.M01	10009405	MOTORREDUCTOR 531RF531	4320.00	1	4311.00	9.00	4311.00	9.0	2	6	4	1	0	25	50
296	531.RF532.M01	10009408	MOTORREDUCTOR 531RF532	4320.00	1	4314.00	6.00	4314.00	6.0	2	6	4	1	0	25	50
302	531.F#560.M01	10008833	MOTORVENTILADOR DE COLECTOR PRINCIPAL	4320.00	3	4314.00	6.00	1438.00	2.0	3	10	2	2	4	26	78
304	531.LD555.M01	10009412	MOTOR DAMPER 531FN560	4320.00	1	4315.00	5.00	4315.00	5.0	2	6	4	1	0	25	50
308	531.MD561.M01	10008834	MOTORVENTILADOR COLECTOR PRINCIPAL	4320.00	3	4312.00	8.00	1437.33	1.7	3	10	4	2	6	48	144
315	531.LD565.M01	10009418	MOTOR DAMPER 531LD565	4320.00	1	4305.00	15.00	4305.00	15.0	2	6	4	2	0	26	52

Fuente: Elaboración propia

ANEXO E. FICHAS TÉCNICAS

E1. MOTOR 1

DESCRIPCIÓN	MOTOR PRINCIPAL																												
CÓDIGO	531.MD140M01																												
DATOS DEL MOTOR 	<table border="1"> <tr> <td>FABRICANTE</td> <td>MENZEL</td> </tr> <tr> <td>MODELO</td> <td>MEBSSL 710-06-196</td> </tr> <tr> <td>FABRICACIÓN N° DE SERIE</td> <td>145239-0001-2015-36062</td> </tr> <tr> <td>POTENCIA (KW)</td> <td>3750</td> </tr> <tr> <td>VOLTAJE (V)</td> <td>6600</td> </tr> <tr> <td>CORRIENTE (A)</td> <td>394</td> </tr> <tr> <td>VELOCIDAD (RPM)</td> <td>991</td> </tr> <tr> <td>FACTOR DE POTENCIA</td> <td>0.86</td> </tr> <tr> <td>FRECUENCIA (HZ)</td> <td>50</td> </tr> <tr> <td>GRADO DE PROTECCION</td> <td>55</td> </tr> <tr> <td>N° FASE</td> <td>3~</td> </tr> <tr> <td>PESO (KG)</td> <td>19000</td> </tr> <tr> <td>RODAMIENTO DELANTERO</td> <td>UN 1048 M/C3</td> </tr> <tr> <td>RODAMIENTO TRASERO</td> <td>UN 1048 M/C3+6048 M/C3</td> </tr> </table>	FABRICANTE	MENZEL	MODELO	MEBSSL 710-06-196	FABRICACIÓN N° DE SERIE	145239-0001-2015-36062	POTENCIA (KW)	3750	VOLTAJE (V)	6600	CORRIENTE (A)	394	VELOCIDAD (RPM)	991	FACTOR DE POTENCIA	0.86	FRECUENCIA (HZ)	50	GRADO DE PROTECCION	55	N° FASE	3~	PESO (KG)	19000	RODAMIENTO DELANTERO	UN 1048 M/C3	RODAMIENTO TRASERO	UN 1048 M/C3+6048 M/C3
FABRICANTE	MENZEL																												
MODELO	MEBSSL 710-06-196																												
FABRICACIÓN N° DE SERIE	145239-0001-2015-36062																												
POTENCIA (KW)	3750																												
VOLTAJE (V)	6600																												
CORRIENTE (A)	394																												
VELOCIDAD (RPM)	991																												
FACTOR DE POTENCIA	0.86																												
FRECUENCIA (HZ)	50																												
GRADO DE PROTECCION	55																												
N° FASE	3~																												
PESO (KG)	19000																												
RODAMIENTO DELANTERO	UN 1048 M/C3																												
RODAMIENTO TRASERO	UN 1048 M/C3+6048 M/C3																												
INSTRUMENTACIÓN   <p>AS-062 Acceleration Sensor AS-062 Acceleration Sensor</p> <p>Model: AS-062 Acceleration Sensor Type: Piezoelectric Sensitivity: 100 mV/g Frequency range: 1.5 Hz ... 10 kHz (0.5 dB) Min. Temp: -30 °C Max. Temp: 125 °C Hazardous area approved: no Accessories: connection cable type: integral</p> 	VIBRACIÓN <table border="1"> <tr> <td>TIPO DE INSTRUMENTO</td> <td>Sensor vibracion</td> </tr> <tr> <td>FABRICANTE</td> <td>B&K VIBRO</td> </tr> <tr> <td>MODELO</td> <td>AS - 062</td> </tr> <tr> <td>SERVICIO</td> <td>vibracion en eje</td> </tr> <tr> <td>CANTIDAD</td> <td>2</td> </tr> </table>	TIPO DE INSTRUMENTO	Sensor vibracion	FABRICANTE	B&K VIBRO	MODELO	AS - 062	SERVICIO	vibracion en eje	CANTIDAD	2																		
TIPO DE INSTRUMENTO	Sensor vibracion																												
FABRICANTE	B&K VIBRO																												
MODELO	AS - 062																												
SERVICIO	vibracion en eje																												
CANTIDAD	2																												
PLACA CARACTERÍSTICA MOTOR 	RODAMIENTOS <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">DATOS DEL DESCANSO DELANTERO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>TIPO DE RODAMIENTO</td> <td>NU 1048 M/C3 + 6048 M/C3</td> </tr> <tr> <td>MAXIMA TEMPERATURA (°C)</td> <td>85</td> </tr> <tr> <td>TIPO DE GRASA</td> <td>SHELL GADUS S2V100 2</td> </tr> <tr> <td>GRASA (kg)</td> <td>0.134</td> </tr> <tr> <td>HORAS TRABAJANDO</td> <td>4500</td> </tr> </tbody> <thead> <tr> <th colspan="2">DATOS DEL DESCANSO TRASERO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>TIPO DE RODAMIENTO</td> <td>NU 1048 M/C3</td> </tr> <tr> <td>MAXIMA TEMPERATURA (°C)</td> <td>85</td> </tr> <tr> <td>TIPO DE GRASA</td> <td>SHELL GADUS S2V100 2</td> </tr> <tr> <td>GRASA (kg)</td> <td>0.067</td> </tr> <tr> <td>HORAS TRABAJANDO</td> <td>4500</td> </tr> </tbody> </table>	DATOS DEL DESCANSO DELANTERO		TIPO DE RODAMIENTO	NU 1048 M/C3 + 6048 M/C3	MAXIMA TEMPERATURA (°C)	85	TIPO DE GRASA	SHELL GADUS S2V100 2	GRASA (kg)	0.134	HORAS TRABAJANDO	4500	DATOS DEL DESCANSO TRASERO		TIPO DE RODAMIENTO	NU 1048 M/C3	MAXIMA TEMPERATURA (°C)	85	TIPO DE GRASA	SHELL GADUS S2V100 2	GRASA (kg)	0.067	HORAS TRABAJANDO	4500				
DATOS DEL DESCANSO DELANTERO																													
TIPO DE RODAMIENTO	NU 1048 M/C3 + 6048 M/C3																												
MAXIMA TEMPERATURA (°C)	85																												
TIPO DE GRASA	SHELL GADUS S2V100 2																												
GRASA (kg)	0.134																												
HORAS TRABAJANDO	4500																												
DATOS DEL DESCANSO TRASERO																													
TIPO DE RODAMIENTO	NU 1048 M/C3																												
MAXIMA TEMPERATURA (°C)	85																												
TIPO DE GRASA	SHELL GADUS S2V100 2																												
GRASA (kg)	0.067																												
HORAS TRABAJANDO	4500																												

Fuente: Elaboración propia

E2. MOTOR 2

DESCRIPCIÓN	MOTOR PRINCIPAL																								
CÓDIGO	531.MD150M01																								
DATOS DEL MOTOR 	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>FABRICANTE</td> <td style="text-align: right;">MENZEL</td> </tr> <tr> <td>MODELO</td> <td style="text-align: right;">MEBKGR 355XD-04-19</td> </tr> <tr> <td>Nro DE SERIE</td> <td style="text-align: right;">145242-0001-2015-360</td> </tr> <tr> <td>POTENCIA (kW)</td> <td style="text-align: right;">450</td> </tr> <tr> <td>VOLTAJE (V)</td> <td style="text-align: right;">380D</td> </tr> <tr> <td>CORRIENTE (A)</td> <td style="text-align: right;">823</td> </tr> <tr> <td>VELOCIDAD (rpm)</td> <td style="text-align: right;">1487</td> </tr> <tr> <td>FACTOR DE POTENCIA</td> <td style="text-align: right;">0.86</td> </tr> <tr> <td>FRECUENCIA (Hz)</td> <td style="text-align: right;">50</td> </tr> <tr> <td>GRADO DE PROTECCION</td> <td style="text-align: right;">55</td> </tr> <tr> <td>Nº FASE</td> <td style="text-align: right;">3~</td> </tr> <tr> <td>PESO (Kg)</td> <td style="text-align: right;">2850</td> </tr> </table>	FABRICANTE	MENZEL	MODELO	MEBKGR 355XD-04-19	Nro DE SERIE	145242-0001-2015-360	POTENCIA (kW)	450	VOLTAJE (V)	380D	CORRIENTE (A)	823	VELOCIDAD (rpm)	1487	FACTOR DE POTENCIA	0.86	FRECUENCIA (Hz)	50	GRADO DE PROTECCION	55	Nº FASE	3~	PESO (Kg)	2850
FABRICANTE	MENZEL																								
MODELO	MEBKGR 355XD-04-19																								
Nro DE SERIE	145242-0001-2015-360																								
POTENCIA (kW)	450																								
VOLTAJE (V)	380D																								
CORRIENTE (A)	823																								
VELOCIDAD (rpm)	1487																								
FACTOR DE POTENCIA	0.86																								
FRECUENCIA (Hz)	50																								
GRADO DE PROTECCION	55																								
Nº FASE	3~																								
PESO (Kg)	2850																								
RODAMIENTOS <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>RODAMIENTO DELANTERO</td> <td style="text-align: right;">6322 C3</td> </tr> <tr> <td>RODAMIENTO TRASERO</td> <td style="text-align: right;">6322 C3 VL0241</td> </tr> <tr> <td>CANT. RODAMIENTO DEL.</td> <td style="text-align: right;">60g</td> </tr> <tr> <td>CANT. RODAMIENTO TRA.</td> <td style="text-align: right;">60g</td> </tr> <tr> <td>TIPO DE GRASA</td> <td style="text-align: right;">ESSO UNIREX N3</td> </tr> <tr> <td>PERIODO DE CAMBIO</td> <td style="text-align: right;">3500 h</td> </tr> </table>	RODAMIENTO DELANTERO	6322 C3	RODAMIENTO TRASERO	6322 C3 VL0241	CANT. RODAMIENTO DEL.	60g	CANT. RODAMIENTO TRA.	60g	TIPO DE GRASA	ESSO UNIREX N3	PERIODO DE CAMBIO	3500 h	TIPO DE MONTAJE Flexible 												
RODAMIENTO DELANTERO	6322 C3																								
RODAMIENTO TRASERO	6322 C3 VL0241																								
CANT. RODAMIENTO DEL.	60g																								
CANT. RODAMIENTO TRA.	60g																								
TIPO DE GRASA	ESSO UNIREX N3																								
PERIODO DE CAMBIO	3500 h																								
PLACA CARACTERÍSTICA MOTOR <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div data-bbox="203 1545 886 1814">  </div> <div data-bbox="906 1545 1406 1814">  </div> </div>																									

Fuente: Elaboración propia

E3. EQUIPOS UTILIZADOS EN TAREAS PREDICTIVAS

CÁMARA TERMOGRÁFICA – FLIR E6



ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
	FLIR E6
Resolución IR	160 x 120
Cantidad de Píxeles	19.200
Sensibilidad Térmica (N.E.T.D.)	<0.6°
CARACTERÍSTICAS COMUNES	
Exactitud	±2°C (±3.6°F) o 2%
Rango de Temperatura	-4 to 482°F (-20°C a 250°C)
Campo de visión	45° x 34°
Enfoque	Automático
Detector	Microbolómetro no Refrigerado FPA
Pantalla	3" LCD 320x240
Frecuencia de Imágen	9Hz
Emisividad	Ajustable de 0.1 a 1
HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS	
Paletas de Colores	Hierro/Arcoiris/Gris
Modos de Medición	Punto Punto, Área, Isotermas
GRABACION DE IMÁGENES	
Formato de Archivo	JPG Radiométrico (+500 imágenes)

Fuente: <https://www.flir.com.mx/browse/professional-tools/thermography-cameras/>

VIBROMETRO

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
modelo	A4900 VIBRO M
características	
mediciones	<ul style="list-style-type: none"> › VALORES ISO [mm/s - ips] › Valores de medición en rodamientos [g] › ISO 10816-3 incluido › Detección automática de velocidad
Tipos de datos	<ul style="list-style-type: none"> › Valores globales › Señales de tiempo ' › Bandas de frecuencia › Espectro FFT
Panel superior	<ul style="list-style-type: none"> › Entrada de sensor - ACC ICP® › Sensor de temperatura sin contacto IR › Estroboscopio LED › Salida para estetoscopio
Diseño industrial	<ul style="list-style-type: none"> › Carcasa de aluminio muy resistente › Funda de goma › Acumulador Li-Ion › 16 horas de duración



Fuente: <https://adash.com/portable-vibration-devices/a4300-va3-vibration-analyzer>

ANEXO F. CÓDIGO REALIZADO EN PYTHON PAR EL ANÁLISIS DE VIBRACIONES GLOBALES

Código para el análisis comparativo de motores críticos

```
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt

#df= pd.read_csv('Lubricacion motores V2.1 MODIF PARA TESIS.csv')
df = pd.read_excel('DATOS DE VIBRACIONES 2023.xlsx')
df.head(5)

# Convertir la columna FECHA al formato datetime
df['FECHA'] = pd.to_datetime(df['FECHA'])

# Filtrar los datos para los tres equipos específicos (por ejemplo, 'Equipo1', 'Equipo2', 'Equipo3')
equipos_seleccionados = ['531.MD140.M01', '531.MD150.M01', '531.FN730.M01', '531.FN560.M01']

# Crear una figura y ejes para cada equipo
fig, axs = plt.subplots(len(equipos_seleccionados), 1, figsize=(18, 20), sharex=True)

# Graficar las curvas de VIBRACION vs FECHA para cada equipo seleccionado
for i, equipo in enumerate(equipos_seleccionados):
    df_equipo = df[df['Cod Ant'] == equipo]
    axs[i].plot(df_equipo['FECHA'], df_equipo[['M1V', 'M2V', 'M1H', 'M2H']], marker='o')
    axs[i].set_ylabel('[mm/s]')
    axs[i].set_title(f'Equipo: {equipo}')
    axs[i].legend(['M1V', 'M2V', 'M1H', 'M2H']) # Agregar la leyenda al subplot actual
    axs[i].grid(True) # Agregamos grid en los graficos
# Establecer los límites del eje x para el rango de fechas deseado
    axs[i].set_xlim(pd.to_datetime('2019-03-01'), pd.to_datetime('2019-04-14'))

# Personalizar la gráfica

plt.xlabel('Fecha')

# Rotar las etiquetas del eje x para que se vean mejor las fechas en el último subplot
plt.xticks(rotation=45)

# Ajustar los espacios entre subplots para que no se superpongan los títulos
plt.tight_layout()

# Mostrar la gráfica
plt.show()
```

Código para un análisis general de la base de datos obtenido en tareas predictivas

1. INPORTANDO LIBRERIAS DE PYTHON

```
import numpy as np
import pandas as pd
import seaborn as sns
import matplotlib.pyplot as plt
%matplotlib inline

# plotly packages
from plotly.offline import iplot
import plotly as py
import plotly.tools as tls
import cufflinks as cf

# codigo necesario para graficas del tipo iplot (plotly)
py.offline.init_notebook_mode(connected=True)
cf.go_offline()
```

Fuente: Elaboración propia

2. IMPORTANDO DATOS

(A. RECOLECCION DE DATOS)

Importamos la base de datos obtenida en el Analisis de Vibraciones de las tareas de Mantenimiento Predictivo (PdM)

```
#datos = pd.read_csv('Lubricacion motores V2.1 MODIF PARA TESIS.csv')
```

```
datos = pd.read_excel('DATOS DE VIBRACIONES 2023.xlsm')
```

```
datos.head(10)
```

3.1 Datos necesarios para el Analisis

```
# Agrupando datos necesarios del Data Frame (solo datos de vibraciones para el analisis).
```

```
datos_vib = datos.loc[:,['Cod Ant', 'FECHA', 'M1V', 'RM1V', 'M1H', 'RM1H', 'M2V', 'RM2V', 'M2H', 'RM2H', 'M2A', 'RM2A', 'B', 'C', 'D']]
datos_vib
```

3.1.1 Tipo de Datos

```
# Tipo de datos presentes en el DataFrame
datos_vib.dtypes
```

```
# Combinado Los "datos de tiempo" que esta en tipo object a tipo datetime.
```

```
datos_vib['FECHA'] = pd.to_datetime(datos_vib['FECHA'])
datos_vib.info()
```

4. ANALISIS GENERAL O GLOBAL DE LA BASE DE DATOS

(C. EXPLORACIÓN DE DATOS)

ANALISIS GENERAL DE LOS DATOS SEGUN LECTURAS TOMADAS EN EL ANALISIS DE VIBRACIONES

DATOS TOMADOS PARA EL ANALISIS:

M1V, RM1V, M1H, RM1H, M2V, RM2V, M2H, RM2H, M2A, RM2A

==>DEL DATAFRAME ANTERIOR:

```
# Colocando como index Los datos de codigos de Equipo (Cod Ant) y La fecha de toma de datos (FECHA)
```

```
datos_vib2 = datos_vib.set_index(['Cod Ant', 'FECHA'])
##datos_vib2 = datos_vib.set_index(['FECHA'])
```

```
# Ordenamos el index en orden alfabetico para ubicar Los queipos y Los datos tomados.
```

```
datos_vib2.sort_index(inplace=True)
datos_vib2.rename(columns= {'B': 'Bueno', 'C': 'Regular', 'D': 'Critico'}, inplace= True)
datos_vib2
```

```
# Realizando un analisis global de todos Los DATOS que contamos.
```

```
#GRAFICA DE VIBRACIONES AGRUPADOS POR EQUIPO Y FECHA
datos_vib2.iplot(dimensions= [920,750], title= 'Datos de vibraciones agrupados por Equipo',
                xTitle= 'Datos agrupados por Nombre y Fecha',
                yTitle= 'Vibración [mm/s]')
```

Fuente: Elaboración propia

6. ANALISIS DE DATOS POR EQUIPO

```
df_equipo= datos_vib2.reset_index()

# datos_por_equipo = datos.Loc[(datos['Cod Ant'] == 'Z3U13') & (datos['M2A'] > 0)]

Equip_Analis = input('Cod Ant: ')
Equip_Analis

Dato_Analizado = input('Dato Analizado: ')
Dato_Analizado

datos_por_equipo = df_equipo.loc[(df_equipo['Cod Ant'] == Equip_Analis) & (df_equipo[Dato_Analizado]>0 )]

print('...**GRAFICAS DEL EQUIPO**...')
print('')
datos_por_equipo

df6 = datos_por_equipo.set_index('FECHA')

***Grafica tipo barras***
#grafica_equipo = df6[Dato_Analizado].plot(kind = 'bar',figsize= (20,10) )
grafica_equipo = df6[Dato_Analizado].iplot(kind = 'bar', color = 'green',
                                           title= Equip_Analis, xTitle= 'Fecha', yTitle= 'vibración [mm/s]' )

***grafica lineal***

df6[Dato_Analizado].iplot(mode='lines+markers', size=6, opacity=0.7,title= Equip_Analis, xTitle= 'Fecha', yTitle= 'vibración [mm/s]' )

# Definir colores personalizados para cada conjunto de datos

custom_colors = {
    'Bueno': 'green',
    'Regular': 'yellow',
    'Critico': 'red',
    'M1H': 'blue',
    'M2H': 'purple',
    'M1V': 'orange',
    'M2V': 'pink',
    'RM2A': 'brown',
    'M2A': 'gray',
    'RM1H': 'cyan',
    'RM2H': 'magenta',
    'RM1V': 'lime',
    'RM2V': 'teal'}

fig= df6.drop(['Cod Ant'], axis= 1).iplot(mode='lines+markers',size=6, opacity=0.7,colors= custom_colors,
                                          title= Equip_Analis, xTitle= 'Fecha', yTitle= 'vibración [mm/s]' )

***DataFrame del equipo seleccionado***

print('DATAFRAME POR EQUIPO')
df7= datos_por_equipo.style.background_gradient(subset=["M1V", "M1H","M2H","M2V",'Bueno','Regular','Critico'],
                                              cmap='RdYlGn_r', vmin=2.8, vmax=11)

df7

***HEATMAP***
df6_aa= df6.drop(['Cod Ant'], axis=1)

print('HeatMap (mapa de calor del equipo)')
print(Equip_Analis)

sns.set(rc= {'figure.figsize':(10,8)})
ax= sns.heatmap(df6_aa, cmap='RdYlGn_r', annot=True, fmt=".1f",linewidth=.1,vmax=11)

df7
```

Fuente: Elaboración propia

```

# Valor Promedio de Los Datos Adquiridos del Equipo
print('Equipo Analizado:', Equip_Analis )

#df6.loc['KK103'].iplot(kind= 'bar')
#toma_de_datos= df_equipo.drop('Cod Ant', axis=1).set_index('FECHA')
#toma_de_datos= df_equipo.set_index('Cod Ant', 'FECHA')
toma_de_datos= df_equipo.groupby('Cod Ant').mean()
toma_de_datos
toma_de_datos.loc[ Equip_Analis].iplot(kind= 'bar', color= 'gray',
                                     title= ('Valor Promedio de los Datos Adquiridos del Equipo'),
                                     xTitle='Datos medidos',
                                     yTitle= 'Valor promedio [mm/s]')

```

```

# Descripcion estadistico del equipo seleccionado

```

```

print('Equipo Analizado:', Equip_Analis )
datos_por_equipo.describe()

```

```

# Grafica tipo BOX para el equipo seleccionado

```

```

grafbox = datos_por_equipo.drop(['Cod Ant', 'FECHA'],axis=1).iplot(kind = 'box',title= 'GRAFICA TIPO CAJA DE VIBRACIONES',
yTitle= 'VIBRACIÓN [mm/s]',xTitle= 'DATOS LEIDOS',
filename='GRÁFICA DE VIBRACIONES TIPO BOX DE VALORES ACUMULADOS ')

```

```

#Grafica de Las valores medidos del equipo en analisis

```

```

print(Equip_Analis)
fig= df6.drop(['Cod Ant', 'Bueno', 'Regular', 'Critico'], axis=1).iplot( kind = 'scatter',
mode='lines+markers', size=6, opacity=0.7,
orientation='v', subplots= True,dimensions= [920, 1200],
title='GRAFICA DE VIBRACIONES TIPO BARRAS - VALORES ACUMULADOS',
xTitle= 'TIEMPO', yTitle= 'VIBRACION [mm/s]',
filename='GRAFICA DE VIBRACIONES TIPO BARRA DE VALORES ACUMULADOS ')

```

Fuente: Elaboración propia

ANEXO G. CÓDIGO REALIZADO EN PYTHON PAR EL ANÁLISIS DE TERMOGRAFÍA

TERMOGRAFÍA

IMPORTACIÓN DE DATOS

```

#IMPORTANDO LIBRERIAS DE PYTHON

```

```

import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt

```

```

# plotly packages
from plotly.offline import iplot
import plotly as py
import plotly.tools as tils
import cufflinks as cf

```

```

# codigo necesario para graficas del tipo iplot (plotly)
py.offline.init_notebook_mode(connected=True)
cf.go_offline()

```

```

#IMPORTANDO BASE DE DATOS

```

```

df = pd.read_excel('DATOS DE TERMOGRAFÍA 2023.xlsx')
df.head(5)

```

Fuente: Elaboración propia

PREPARACIÓN DE DATOS

```
M #VISUALIZANDO TIPOS DE DATOS
df.info()

M #FILTRANDO DATOS DE LA BASE DE DATOS ORIGINAL
df= df.loc[:,['Cod Ant','FECHA', 'T1','T2', 'T3']]

M #VERIFICAMOS SI EXISTEN DATOS NULOS
df.isnull()

M #LLENAMOS DATOS NULOS POR VALORES MEDIOS
#df1 = df[['T1','T2','T3']] = df[['T1','T2','T3']].fillna(df[['T1','T2','T3']].median())

# ELIMINAMOS DATOS NULOS
df1 =df.dropna()
#df

M #DATAFRAME FINAL PARA EL ANALISIS OBTENIDO LUEGO DE LA LIMPIEZA
df1.isnull()

M df1.describe()
```

Fuente: Elaboración propia

ANÁLISIS COMPARATIVO DE TEMPERATURA PARA VARIOS EQUIPOS

```
M #LISTA DE LOS EQUIPOS
#df['Cod Ant'].unique()

M # CODIGO PARA VISUALIZACIÓN DE DATOS PARA EQUIPOS SELECCIONADOS

# Convertir la columna FECHA al formato datetime
df1['FECHA'] = pd.to_datetime(df['FECHA'])

# ##### EQUIPOS A ANALISAR #####
equipos_seleccionados = ['531.MD140.M01', '531.SR150.M01', '531.FN730.M01','531.FN560.M01'] # EL EQUIPO: SR150 = MD150

# Creando una figura y ejes para cada equipo
fig, axs = plt.subplots(len(equipos_seleccionados), 1, figsize=(18, 20), sharex=True)

# Graficar las curvas de VIBRACION vs FECHA para cada equipo seleccionado
for i, equipo in enumerate(equipos_seleccionados):
    df_equipo = df1[df1['Cod Ant'] == equipo]
    print(df_equipo)
    axs[i].plot(df_equipo['FECHA'], df_equipo[['T1','T2','T3']],marker='o')
    axs[i].set_ylabel('Temperatura [°C]')
    axs[i].set_title(f'Equipo: {equipo}')
    axs[i].legend(['T1','T2','T3']) # Agregar la Leyenda al subplot actual
    axs[i].grid(True) # Agregamos grid en los graficos
# Establecer los límites del eje x para el rango de fechas deseado
#axs[i].set_xlim(pd.to_datetime('2018-05-01'), pd.to_datetime('2019-08-14'))

# Personalizar la gráfica

plt.xlabel('Fecha')

# Rotar las etiquetas del eje x para que se vean mejor las fechas en el último subplot
plt.xticks(rotation=45)

# Ajustar los espacios entre subplots para que no se superpongan los títulos
plt.tight_layout()

# Mostrar la gráfica
plt.show()
```

Fuente: Elaboración propia

ANÁLISIS DE TERMOGRAFÍA POR EQUIPO

```
▶ #LISTA DE LOS EQUIPOS
df['Cod Ant'].unique()
```

```
▶ ## REPRESENTACIÓN GRÁFICAS DE DATOS POR EQUIPO EN HISTOGRAMAS Y VALORES PROMEDIO DE TEMPERATURA

Equipo_Analis = input('equipo que quiere analizar: ' )

# Verificar si el equipo existe en tus datos
if Equipo_Analis in df1['Cod Ant'].unique():

    print(f'Análisis del equipo...')
    df2= df1.loc[df['Cod Ant']==Equipo_Analis].drop(['Cod Ant','FECHA'],axis=1)
    df2.iplot(kind = 'histogram', bins=50,
              title = 'HISTOGRAMA DE DISTRUBUCIÓN DE TEMPERATURAS',
              yTitle= 'CANTIDAD',xTitle= 'TEMPERATURA [C]',
              filename='GRAFICA DE TERMOGRAFÍA TIPO BARRA DE VALORES ACUMULADOS ')

    df3= df1.groupby('Cod Ant').mean()
    df3.loc[ Equipo_Analis].iplot(kind= 'bar', color= 'gray',
                                title= ('Valor Promedio de los Datos Adquiridos del Equipo'),
                                xTitle='DATOS',
                                yTitle= 'Valor promedio Temperatura [C]')

else:
    print(f'El equipo {Equipo_Analis} no se encontró en los datos.')
# Valor Promedio de Los Datos Adquiridos del Equipo
print('Equipo Analizado:', Equipo_Analis )
```

```
▶ ## ANALISIS POR PUNTO DE TEMPERATURA Y VALOR PROMEDIO - TENDENCIAS

df3= df1.loc[df['Cod Ant']==Equipo_Analis]

# Calcular el promedio de T1, T2 y T3 para cada punto medido
df3['Promedio'] = df3[['T1', 'T2', 'T3']].mean(axis=1)

# Crear una figura y ejes para La gráfica
fig, axs = plt.subplots(4,1,figsize=(17, 10))

# Graficar para cada punto

axs[0].plot(df3['FECHA'], df3['T1'], label='T1', marker='o', linestyle='--')
axs[0].set_title('Gráfica valores de T1, T2, T3 y Promedio')
axs[0].set_xlabel('Fecha')
axs[0].set_ylabel('Temperatura [°C]')
axs[0].legend()
axs[0].grid()

axs[1].plot(df3['FECHA'], df3['T2'], label='T2', marker='o', linestyle='--')
axs[1].set_xlabel('Fecha')
axs[1].set_ylabel('Temperatura [°C]')
axs[1].legend()
axs[1].grid()

axs[2].plot(df3['FECHA'], df3['T3'], label='T3', marker='o', linestyle='--')
axs[2].set_xlabel('Fecha')
axs[2].set_ylabel('Temperatura [°C]')
axs[2].legend()
axs[2].grid()

axs[3].plot(df3['FECHA'], df3['Promedio'], label='Promedio',color= 'r', marker='s', linewidth=3,markersize=8, mfc= 'b')
axs[3].set_xlabel('Fecha')
axs[3].set_ylabel('Temperatura [°C]')
axs[3].legend()
axs[3].grid()

# Ajustar los espacios entre subplots para que no se superpongan los títulos
plt.tight_layout()

# Mostrar la gráfica
print("EQUIPO ANALIZADO:")
print(Equipo_Analis)
plt.show()
```

Fuente: Elaboración propia

```

▶ ## ANALISIS GLOBAL DE TEMPERATURA Y VALOR PROMEDIO CON LIMITES DE TEMPERATURA - TENDENCIAS

# Calcular el promedio de T1, T2 y T3 para cada punto medido
df3['Promedio'] = df1[['T1', 'T2', 'T3']].mean(axis=1)

fig, axs = plt.subplots(4, 1, figsize=(17, 10))

columnas = ['T1', 'T2', 'T3', 'Promedio']

colores = ['b', 'g', 'm', 'r']
marcadores = ['o', 's', '^', 'D']

for i, columna in enumerate(columnas):

    axs[i].plot(df3['FECHA'], df3[columna], label=columna, color=colores[i], marker=marcadores[i], linestyle='--')
    axs[i].set_title(f'Gráfica de {columna}')
    axs[i].set_xlabel('Fecha')
    axs[i].set_ylabel('Temperatura [C]')
    axs[i].legend()
    axs[i].grid()

    # Agregar líneas de cuadrícula personalizadas para dividir en zonas de temperatura
    axs[i].axhline(y=25, color='y', linestyle='--', linewidth=1) # Límite inferior
    axs[i].axhline(y=65, color='orange', linestyle='--', linewidth=1) # Límite medio
    axs[i].axhline(y=85, color='red', linestyle='--', linewidth=1) # Límite superior

plt.tight_layout()

print('equipo analizado....')
print(Equipo_Analis)

plt.show()

```

```

▶ ## ANALISIS GLOBAL DE TEMPERATURA Y VALOR PROMEDIO - TENDENCIAS

# Calcular el promedio de T1, T2 y T3 para cada punto medido
df3['Promedio'] = df1[['T1', 'T2', 'T3']].mean(axis=1)

# Crear una figura y ejes para la gráfica
fig, ax = plt.subplots(figsize=(17, 6))

# Graficar T1, T2, T3 y el promedio en la misma gráfica
ax.plot(df3['FECHA'], df3['T1'], label='T1', marker='o', linestyle='--')
ax.plot(df3['FECHA'], df3['T2'], label='T2', marker='o', linestyle='--')
ax.plot(df3['FECHA'], df3['T3'], label='T3', marker='o', linestyle='--')
ax.plot(df3['FECHA'], df3['Promedio'], label='Promedio', marker='s', linewidth=3, markersize=8, mfc='r')

# Agregar líneas de cuadrícula personalizadas para dividir en zonas de temperatura
#ax.axhline(y=20, color='y', linestyle='--', linewidth=1) # Límite inferior
#ax.axhline(y=60, color='orange', linestyle='--', linewidth=1) # Límite medio
#ax.axhline(y=80, color='red', linestyle='--', linewidth=1) # Límite superior

# Personalizar la gráfica (título, etiquetas, leyenda, etc.)
ax.set_xlabel('Fecha')
ax.set_ylabel('Temperatura [°C]')
ax.set_title('Gráfica valores de T1, T2, T3 y Promedio')
ax.set_facecolor('whitesmoke')
ax.legend()
ax.grid()

# Mostrar la gráfica
print('EQUIPO ANALIZADO:')
print(Equipo_Analis)
plt.show()

```

Fuente: Elaboración propia

AUTOR: RONALD ERACLIO TRUJILLO FERNANDEZ

ronald.tru.fer@gmail.com

Cel. 70651590



2023-TTES-1857-D-1

DIRECCIÓN DE DERECHO DE AUTOR
Y DERECHOS CONEXOS
RESOLUCIÓN ADMINISTRATIVA NRO. 1-3982/2023
La Paz, 22 de Noviembre del 2023

VISTOS:

La solicitud de Inscripción de Derecho de Autor presentada en fecha **15 de Noviembre del 2023**, por **RONALD ERACLIO TRUJILLO FERNANDEZ** con C.I. N° **8311094 LP**, con número de trámite **DA 2206/2023**, señala la pretensión de inscripción del Proyecto de Grado titulado: "**MANTENIMIENTO PREDICTIVO DE MOTORES ELÉCTRICOS**", cuyos datos y antecedentes se encuentran adjuntos y expresados en el Formulario de Declaración Jurada.

CONSIDERANDO

Que, en observación al Artículo 4° del Decreto Supremo N° 27938 modificado parcialmente por el Decreto Supremo N° 28152 el "*Servicio Nacional de Propiedad Intelectual SENAPI, administra en forma desconcentrada e integral el régimen de la Propiedad Intelectual en todos sus componentes, mediante una estricta observancia de los regímenes legales de la Propiedad Intelectual, de la vigilancia de su cumplimiento y de una efectiva protección de los derechos de exclusiva referidos a la propiedad industrial, al derecho de autor y derechos conexos; constituyéndose en la oficina nacional competente respecto de los tratados internacionales y acuerdos regionales suscritos y adheridos por el país, así como de las normas y regímenes comunes que en materia de Propiedad Intelectual se han adoptado en el marco del proceso andino de integración*".

Que, el Artículo 16° del Decreto Supremo N° 27938 establece "*Como núcleo técnico y operativo del SENAPI funcionan las Direcciones Técnicas que son las encargadas de la evaluación y procesamiento de las solicitudes de derechos de propiedad intelectual, de conformidad a los distintos regímenes legales aplicables a cada área de gestión*". En ese marco, la Dirección de Derecho de Autor y Derechos Conexos otorga registros con carácter declarativo sobre las obras del ingenio cualquiera que sea el género o forma de expresión, sin importar el mérito literario o artístico a través de la inscripción y la difusión, en cumplimiento a la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina, Ley de Derecho de Autor N° 1322, Decreto Reglamentario N° 23907 y demás normativa vigente sobre la materia.

Que, la solicitud presentada cumple con: el Artículo 6° de la Ley N° 1322 de Derecho de Autor, el Artículo 26° inciso a) del Decreto Supremo N° 23907 Reglamento de la Ley de Derecho de Autor, y con el Artículo 4° de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina.

Que, de conformidad al Artículo 18° de la Ley N° 1322 de Derecho de Autor en concordancia con el Artículo 18° de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina, referentes a la duración de los Derechos Patrimoniales, los mismos establecen que: "*la duración de la protección concedida por la presente ley será para toda la vida del autor y por 50 años después de su muerte, a favor de sus herederos, legatarios y cesionarios*".

"2023 AÑO DE LA JUVENTUD HACIA EL BICENTENARIO"



Que, se deja establecido en conformidad al Artículo 4º de la Ley N° 1322 de Derecho de Autor, y Artículo 7º de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina que: "...No son objeto de protección las ideas contenidas en las obras literarias, artísticas, o el contenido ideológico o técnico de las obras científicas ni su aprovechamiento industrial o comercial".

Que, el artículo 4, inciso e) de la ley 2341 de Procedimiento Administrativo, instituye que: "... en la relación de los particulares con la Administración Pública, se presume el principio de buena fe. La confianza, la cooperación y la lealtad en la actuación de los servidores públicos y de los ciudadanos ...", por lo que se presume la buena fe de los administrados respecto a las solicitudes de registro y la declaración jurada respecto a la originalidad de la obra.

POR TANTO

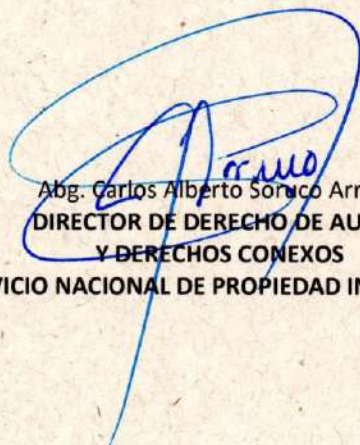
El Director de Derecho de Autor y Derechos Conexos sin ingresar en mayores consideraciones de orden legal, en ejercicio de las atribuciones conferidas

RESUELVE:

INSCRIBIR en el Registro de Tesis, Proyectos de Grado, Monografías y Otras Similares de la Dirección de Derecho de Autor y Derechos Conexos, el Proyecto de Grado titulado: "**MANTENIMIENTO PREDICTIVO DE MOTORES ELÉCTRICOS**", a favor del autor y titular: **RONALD ERACLIO TRUJILLO FERNANDEZ** con C.I. N° **8311094 LP**, quedando amparado su derecho conforme a Ley, salvando el mejor derecho que terceras personas pudieren demostrar.

Regístrese, Comuníquese y Archívese.




Abg. Carlos Alberto Soruco Arroyo
**DIRECTOR DE DERECHO DE AUTOR
Y DERECHOS CONEXOS**
SERVICIO NACIONAL DE PROPIEDAD INTELECTUAL

CASA/ata
c.c. Arch.



"2023 AÑO DE LA JUVENTUD HACIA EL BICENTENARIO"