

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 guiarán 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 mnto. - motor 531.MD140.M01	132
Tabla 4.8 Datos obtenidos de DAR/IP después de Mnto. - 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.

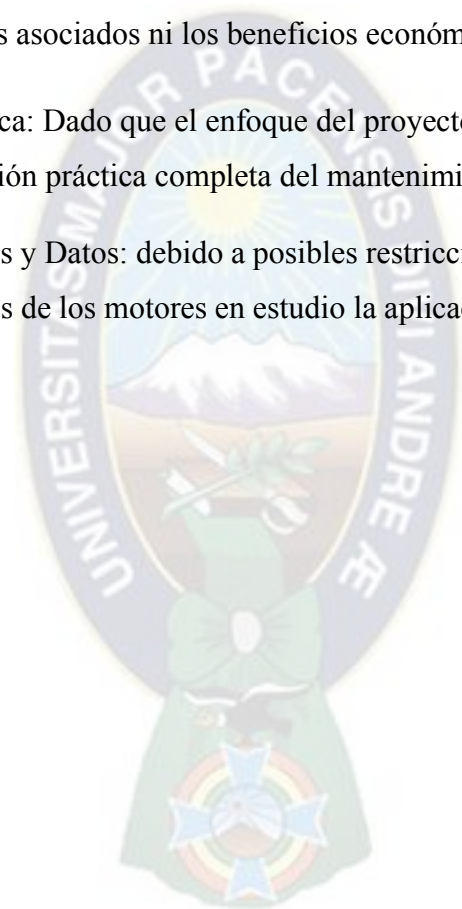
² Que tiene eficiencia.

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