

Universidad Nacional de Ingeniería

Facultad de Ingeniería Mecánica



TESIS

**“Metodología de modificación del neutro del estator para
incrementar la vida útil del aislamiento de motores eléctricos
síncronos de gran potencia”**

Para obtener el Título Profesional de Ingeniero Mecatrónico

Elaborado por

Luis Alberto Rojas Tristan

 [0009-0009-0843-7606](https://orcid.org/0009-0009-0843-7606)

Asesor

MSc. Cesar Elias Mendoza Suarez

 [0000-0002-1013-3187](https://orcid.org/0000-0002-1013-3187)

LIMA – PERÚ

2025

Citar/How to cite	(Rojas, 2025)
Referencia/Reference	Rojas, L. (2025). <i>Metodología de modificación del neutro del estator para incrementar la vida útil del aislamiento de motores eléctricos síncronos de gran potencia</i> . [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

Dedicatoria

A mi familia, que son mi mayor fortaleza y mi refugio en cada paso del camino. Por su amor incondicional, apoyo constante y fe en mis sueños, gracias infinitas. Cada logro es un reflejo de su presencia en mi vida. Con todo mi cariño y gratitud, este trabajo es para ustedes.

Agradecimientos

A los señores Francisco Montes, Jaime Huapaya, Carlos Noriega y Andy Romero, por su valiosa contribución de información y aportes para poder consolidar y formalizar esta investigación.

Resumen

El objetivo de la presente investigación es determinar cómo la metodología de modificación del neutro del estator incrementa la vida útil del aislamiento de motores eléctricos síncronos de gran potencia. La operación de estos motores en entornos altamente exigentes provoca un desgaste acelerado del aislamiento, lo que incrementa los costos operativos y eleva el riesgo de fallas imprevistas.

La metodología empleada en esta investigación sigue un diseño experimental con enfoque cuantitativo, en el que se analizaron cuatro motores industriales con antecedentes de fallas recurrentes. Se recopilaron datos mediante herramientas avanzadas para medir el impacto de la intervención en variables clave como la reducción de fallas, y aumento de la vida útil del aislamiento del estator.

Los resultados obtenidos demuestran que la metodología aplicada aumentó la vida útil del aislamiento hasta en un 100%, lo que evidencia una mejora significativa en la confiabilidad y operatividad de los motores eléctricos en entornos industriales altamente exigentes.

En conclusión, la investigación demuestra que la modificación del neutro del estator es una estrategia efectiva para reducir las interrupciones no planificadas, optimizar el rendimiento industrial y prolongar la vida útil del aislamiento. Además, los hallazgos proporcionan una base técnica relevante para futuras investigaciones enfocadas en mejorar la disponibilidad y confiabilidad de los motores eléctricos síncronos en aplicaciones industriales de alto impacto.

Palabras clave: Modificación del neutro del estator, motores eléctricos síncronos de gran potencia, aislamiento eléctrico, envejecimiento del aislamiento, vida útil del aislamiento, disponibilidad, confiabilidad operativa, reducción de fallas, sistemas industriales críticos.

Abstract

The objective of this research is to determine how the stator neutral modification methodology increases the service life of insulation in high-power synchronous electric motors. The operation of these motors in highly demanding environments causes accelerated insulation wear, leading to increased operating costs and a higher risk of unexpected failures.

The methodology employed in this research follows an experimental design with a quantitative approach, analyzing four industrial motors with a history of recurrent failures. Data were collected using advanced tools to measure the impact of the intervention on key variables such as failure reduction and increased lifespan of stator insulation.

The results obtained demonstrate that the applied methodology increased the insulation lifespan by up to 100%, indicating a significant improvement in the reliability and operability of electric motors in highly demanding industrial environments.

In conclusion, the research demonstrates that stator neutral modification is an effective strategy for reducing unplanned interruptions, optimizing industrial performance, and extending insulation lifespan. Additionally, the findings provide a relevant technical foundation for future research focused on enhancing the availability and reliability of synchronous electric motors in high-impact industrial applications.

Keywords: Stator neutral modification, high-power synchronous electric motors, electrical insulation, insulation aging, insulation lifespan, availability, operational reliability, failure reduction, critical industrial systems.

ÍNDICE

<i>Dedicatoria</i>	.....	iii
<i>Agradecimientos</i>	.....	iv
Resumen	.....	v
Abstract	.....	vi
Introducción	.....	xiv
CAPÍTULO I	.....	1
Generalidades	.....	1
1.1 Antecedentes Investigativos.....		1
1.2 Identificación y Descripción de la Realidad Problemática.....		11
1.3 Formulación del Problema		14
1.3.1 Problema Principal.....		14
1.3.2 Problemas Específicos.....		15
1.4 Justificación e importancia de la investigación		15
1.5 Objetivos.....		16
1.5.1 Objetivo General		16
1.5.2 Objetivos Específicos.....		16
1.6 Hipótesis.....		16
1.6.1 Hipótesis General		16
1.6.2 Hipótesis Específicas		16
1.7 Variables, Dimensiones e Indicadores		17
1.7.1 Variables		17
1.8 Metodología de la Investigación.....		17
1.8.1 Unidad de Análisis		17
1.8.2 Tipo, enfoque y nivel de Investigación.....		18
1.8.3 Diseño de Investigación		19
1.8.4 Periodo de Análisis		19
1.8.5 Población y Muestra		19
1.8.6 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos		20

1.8.7 Análisis y Procesamiento de Datos	20
CAPÍTULO II	21
Marco Teórico y Marco Conceptual	21
2.1 Bases Teóricas.....	21
2.1.1 Motores eléctricos.....	21
2.1.2 Fallas comunes en los motores eléctricos.....	33
2.1.3 Aislamiento eléctrico	34
2.1.4 Motores síncronos de gran potencia	45
2.1.5 Accionamiento para molinos	49
2.1.6 Bobinado de estator de motores síncronos de gran potencia.....	54
2.1.7 Teoría de la ruptura del aislamiento	59
2.1.8 Reparación de fallas de aislamiento.....	63
2.2 Marco Conceptual: Definición de términos o conceptos.....	69
CAPÍTULO III	71
Desarrollo del Trabajo de Investigación	71
3.1 Contexto Operacional del trabajo de investigación.....	71
3.2 Estudio de caso de fallas de bobinados de estator	73
3.2.1 Causas de falla	74
3.2.2 Registro de fallas de bobinado.....	76
3.2.3 Ubicación de fallas.....	84
3.3 Metodología de inversión y modificación del neutro del estator.....	85
3.3.1 Protocolo 1: Inversión del neutro del bobinado del estator	87
3.3.2 Protocolo 2: Modificación del neutro del bobinado del estator.....	92
3.3.3 Protocolo 3: Inversión del neutro modificado del bobinado del estator	99
3.3.4 Fallas y Efecto de la Inversión del Neutro	100
3.4 Soluciones integrales.....	102
CAPÍTULO IV	107
Resultados, Contrastación de Hipótesis y Discusión.....	107
4.1 Resultados.....	107

4.2 Análisis general de la Comparativa	111
4.3 Contrastación de Hipótesis	112
4.4 Discusión	115
Conclusiones	117
Recomendaciones	120
Referencias	123
Anexo	133
Anexo A: Matriz de Consistencia	134
Anexo B Operacionalización de variables	135

Lista de Tablas

Tabla 1 Sistema de aislamiento	40
Tabla 2 Clases térmicas para un aislante según norma EN 60034-18-1-2010	41
Tabla 3 Resumen de Fallas a Tierra en Motores.....	73
Tabla 4 Datos de placa del motor a tratar.....	73
Tabla 5 Registro de fallas en motor síncrono N° 1.....	77
Tabla 6 Registro de fallas en motor síncrono N° 2.....	79
Tabla 7 Registro de fallas en motor síncrono N° 3.....	81
Tabla 8 Registro de fallas en motor síncrono N° 4.....	83
Tabla 9 Registro de años sin fallas en motores eléctricos	87
Tabla 10 Registro de fechas de implementación de inversión del neutro	90
Tabla 11 Vida útil alcanzada sin intervención	91
Tabla 12 Períodos de vida útil del aislamiento con inversión y modificación del neutro	100
Tabla 13 Comparativa de Fallas y Efecto de la Inversión y Modificación del Neutro	101
Tabla 14 Cálculo de envejecimiento de aislamiento de estator en motor síncrono N° 4	108
Tabla 15 Comparativa Incremento de Vida Útil del aislamiento.....	111

Lista de Figuras

Figura 1	<i>Principales tensiones de degradación del aislamiento y sus interrelaciones</i>	13
Figura 2	<i>Diagrama esquemático del proceso de envejecimiento del devanado del estator</i>	14
Figura 3	<i>Partes principales de un motor eléctrico</i>	22
Figura 4	<i>Rotor of Squirrel Cage Induction Motor. (Rotor del motor de inducción de jaula de ardilla)</i>	24
Figura 5	<i>Rotor bobinado</i>	25
Figura 6	<i>Generador síncrono de polos salientes</i>	26
Figura 7	<i>Estator de un motor de inducción con sus respectivos devanados</i>	27
Figura 8	<i>Estator de un motor de inducción trifásico</i>	28
Figura 9	<i>Devanado Preformado</i>	29
Figura 10	<i>El Eje del Rotor</i>	29
Figura 11	<i>Cojinetes y Rodamientos</i>	30
Figura 12	<i>Carcasa de un motor eléctrico</i>	31
Figura 13	<i>Caja de conexiones de un motor eléctrico</i>	32
Figura 14	<i>Placa característica de un motor eléctrico</i>	32
Figura 15	<i>Sistema de aislamiento</i>	35
Figura 16	<i>Barras tipo Roebel</i>	36
Figura 17	<i>Bobinas preformadas</i>	37
Figura 18	<i>Circuito equivalente del aislamiento en bobinas</i>	37
Figura 19	<i>Molienda de Bolas</i>	49
Figura 20	<i>Configuración Americana</i>	50
Figura 21	<i>Molino SAG</i>	51
Figura 22	<i>Accionamiento de molino sin engranajes GMD</i>	52
Figura 23	<i>Configuración estructural de motor anillo de gran potencia que accionan molinos Gearless</i>	53

Figura 24 <i>Pérdidas eléctricas en la eficiencia de un motor sin engranajes de un molino</i>	53
Figura 25 <i>Solución de accionamiento de molino sin engranajes</i>	54
Figura 26 <i>Procesos VPI</i>	56
Figura 27 <i>Capas de un aislamiento</i>	59
Figura 28 <i>Representación simple de Descarga Parcial</i>	62
Figura 29 <i>Tipos de Descargas Parciales</i>	62
Figura 30 <i>Modelo simple de una cavidad dieléctrica</i>	62
Figura 31 <i>La descarga parcial (DP) entre bobinas adyacentes de diferentes fases resulta en un polvo blanco en las superficies de las bobinas</i>	63
Figura 32 <i>Cuello de ranura con barras superior e inferior de diferentes bobinas</i>	65
Figura 33 <i>Proceso de reparación de fallas en barra superior</i>	66
Figura 34 <i>Proceso de reparación de fallas en barra inferior</i>	67
Figura 35 <i>Proceso de reparación de falla con seccionamiento y puenteo de bobina</i> .	69
Figura 36 <i>Ubicación de falla</i>	74
Figura 37 <i>Erosión en la superficie de la bobina</i>	75
Figura 38 <i>Ubicación de la muestra tomada de la bobina para un examen más detallado</i>	75
Figura 39 <i>Corte N° 4 de la sección transversal de la bobina</i>	75
Figura 40 <i>Corte N° 8 de la sección transversal de la bobina</i>	76
Figura 41 <i>Ubicación de fallas de motor síncrono N° 1 (27,000 HP)</i>	84
Figura 42 <i>Flujograma para la aplicación de protocolos de neutro del estator</i>	86
Figura 43 <i>Diagrama esquemático de inversión de la conexión estrella del bobinado del estator</i>	88
Figura 44 <i>Proceso de Inversión del Neutro del estator</i>	89
Figura 45 <i>Distribución de bobinado del estator</i>	94
Figura 46 <i>Esquema de las 6 vueltas del bobinado de cada fase del estator (visto del lado carga del GMD)</i>	95

Figura 47 <i>Diagrama esquemático del bobinado del estator</i>	95
Figura 48 <i>Diagrama esquemático de reconfiguración del bobinado del estator alimentar por la parte media</i>	96
Figura 49 <i>Diagrama esquemático del bobinado del estator</i>	96
Figura 50 <i>Proceso de modificación del neutro del bobinado del estator</i>	97
Figura 51 <i>Proceso de rebobinado del estator</i>	103
Figura 52 <i>Proceso de reemplazo del estator</i>	105
Figura 53 <i>Comparación de la vida útil del aislamiento antes y después de la inversión del neutro del estator en los motores 2, 3 y 4</i>	113
Figura 54 <i>Comparación de la Vida Útil del Aislamiento Antes y Después de la Modificación del Neutro motor 4</i>	114
Figura 55 <i>Comparación de días antes y después de la inversión más la modificación del motor 4</i>	115

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, los motores eléctricos síncronos representan un elemento fundamental en los procesos industriales debido a su capacidad para manejar altas cargas y operar con alta precisión. Sin embargo, el desgaste del aislamiento en los bobinados del estator sigue siendo un problema recurrente que afecta su vida útil y confiabilidad. Este fenómeno, intensificado por tensiones térmicas, mecánicas y eléctricas, genera pérdidas notables tanto en tiempo como en recursos para las empresas.

Esta investigación trata esta problemática mediante la aplicación de una metodología innovadora: la modificación del neutro del estator. Esta propuesta busca mitigar las causas principales de deterioro en el aislamiento, prolongando su durabilidad y asegurando una operación más confiable. La elección de esta técnica responde a la necesidad de soluciones prácticas que puedan ser implementadas de manera eficiente en entornos industriales altamente exigentes.

El estudio se llevó a cabo en motores eléctricos utilizados en la industria minera peruana, un sector donde la confiabilidad operativa es crítica. A través de un diseño experimental, se analizaron los efectos de esta metodología en la vida útil del aislamiento, integrando técnicas avanzadas de monitoreo y análisis de datos para garantizar la precisión de los resultados.

Esta propuesta no solo tiene una gran solución técnica, sino también económica, al reducir los costos asociados a fallas inesperadas y prolongar la vida útil de equipos críticos. Además, se busca contribuir a la comunidad académica ofreciendo una herramienta práctica para ingenieros y especialistas interesados en mejorar la disponibilidad y vida útil de los sistemas eléctricos industriales.

CAPÍTULO I

Generalidades

1.1 Antecedentes Investigativos

En la tesis de García (2024) titulada "*Digital Twins for the Thermal Analysis of Permanent Magnet Synchronous Motors*" El objetivo general fue evaluar la degradación del aislamiento del bobinado tras someter los motores a ciclos térmicos repetitivos. La metodología incluyó experimentos con motores sometidos a envejecimiento térmico a 230 °C, aplicando corriente continua para monitorear el aumento de la temperatura, además de realizar pruebas de aislamiento. Los resultados mostraron que, tras 1000 horas de envejecimiento térmico acumulado, no se observó fallos eléctricos ni cortocircuitos en los motores. Se evidenció una degradación progresiva del aislamiento, con grietas en la resina epoxi a partir de las 300 horas, pero sin fallos significativos. La resistencia entre fases aumentó en un 70% en dos fases conectadas a la fuente DC, y en menor medida en otras fases. En conclusión, se observó que la resistencia del aislamiento disminuye de manera notable tras 700 horas de operación a 230 °C. Este antecedente es relevante para la investigación sobre la vida útil del aislamiento en motores eléctricos síncronos, ya que proporciona datos clave sobre el comportamiento del aislamiento bajo condiciones de estrés térmico.

Trujillo (2023) en su tesis titulada "*Mantenimiento Predictivo de Motores Eléctricos*", tuvo como objetivo general introducir y aplicar técnicas avanzadas de mantenimiento predictivo en motores eléctricos de inducción para maximizar la confiabilidad y rendimiento de estos equipos. La metodología utilizada fue aplicada con un enfoque cuantitativo, empleando técnicas como termografía, análisis de vibraciones y pruebas estáticas, y realizando un monitoreo continuo de parámetros claves en un grupo de motores de una empresa cementera. Los resultados mostraron que la implementación del mantenimiento predictivo, mediante el uso de sistemas de monitoreo y análisis de

datos, mejoró significativamente la disponibilidad y redujo las fallas inesperadas en los motores eléctricos. Además, se implementaron indicadores como el MTBF (tiempo medio entre fallos) y el MTTR (tiempo medio de reparación). La conclusión general resalta que la adopción del mantenimiento predictivo extendió la vida útil de los motores eléctricos y mejoró su eficiencia operativa. Este antecedente es importante para la investigación sobre la vida útil del aislamiento del bobinado en motores eléctricos síncronos, ya que muestra la efectividad de las técnicas predictivas en la detección temprana de fallos, lo cual es clave para prolongar la vida útil de los componentes críticos del motor.

Torres *et al.* (2019) en su investigación titulada "*Revisión de los Métodos de Detección de Fallas en Motores Síncronos de Imanes Permanentes con Aplicaciones para la Industria 4.0,*" tuvo como objetivo analizar las metodologías actuales para la detección de fallas en motores síncronos de imanes permanentes (PMSM), con enfoque en su uso en la industria 4.0. La metodología fue una revisión de estudios de los últimos 10 años, destacando los tipos de fallas, algoritmos y métodos más relevantes. Los resultados indicaron que los fallos más comunes en estos motores son los mecánicos, como la desmagnetización y la excentricidad, los cuales pueden ser detectados mediante el análisis en el dominio de la frecuencia de vibraciones y corrientes en el estator. La conclusión principal señala que la identificación temprana de fallas y su magnitud es crucial para optimizar el mantenimiento preventivo y evitar paradas en la producción. Este antecedente es relevante para la investigación, ya que indica la importancia de la vida útil del aislamiento del bobinado en motores síncronos y el impacto de las fallas eléctricas y mecánicas en su rendimiento y durabilidad.

Mollisaca (2020) en su tesis titulada "*Mantenimiento y Reparación de Motores Eléctricos Síncronos*", tuvo como objetivo general analizar el proceso de mantenimiento y reparación de motores eléctricos. La metodología aplicada incluyó una evaluación técnica detallada del motor, con pruebas eléctricas como la medición de la resistencia

de aislamiento, el índice de polarización y pruebas de temperatura en los devanados. Los resultados mostraron que tras realizar las pruebas de resistencia de aislamiento y el índice de polarización, el motor síncrono evaluado presentó una mejora significativa en sus niveles de aislamiento. La conclusión general destaca que un plan de mantenimiento eficiente puede reducir costos operativos y prolongar significativamente la vida útil del equipo. Este antecedente es crucial para la investigación sobre la vida útil del aislamiento de bobinado en motores eléctricos síncronos, ya que muestra la importancia de realizar un mantenimiento continuo para evitar la degradación prematura del aislamiento.

Elosegui (2021) en su tesis titulada *“Diseño de un motor síncrono de imanes permanentes para la propulsión de aviones regionales”*, tuvo como objetivo evaluar la vida útil del aislamiento del bobinado de los motores eléctricos síncronos. La metodología aplicada fue cuantitativa, centrada en el diseño electromagnético y térmico del motor, incluyendo análisis de las pérdidas por calor y su impacto en el aislamiento de los devanados. Los resultados indicaron que el aislamiento de tipo H (con una temperatura máxima admisible de 180 °C) es crítico para prevenir cortocircuitos. El sistema de refrigeración diseñado mantuvo la temperatura del bobinado dentro de los límites seguros, prolongando la vida útil del aislamiento. La conclusión general destacó que una gestión térmica adecuada es clave para la durabilidad del aislamiento y el rendimiento del motor. Este antecedente es relevante para la investigación, ya que demuestra la importancia de un control preciso de las temperaturas para garantizar la fiabilidad de los motores eléctricos síncronos.

Morote (2019) en su tesis titulada *“Análisis de Armónicos Generados por el Accionamiento con Ciclo convertidor de 12 Pulsos en Molinos Gearless - Motor Síncrono de 20 MW”*, tuvo como objetivo general desarrollar un análisis dinámico para identificar los armónicos predominantes generados por el cicloconvertidor de 12 pulsos que acciona un motor síncrono en un molino *gearless*. La metodología utilizada fue de tipo

aplicada, donde se desarrolló un modelo en Matlab-Simulink para la simulación del comportamiento del sistema, con un enfoque en la identificación de las armónicas predominantes mediante el uso de transformadas de Park y análisis de señales eléctricas. Los resultados mostraron que los armónicos más críticos se producen en las frecuencias de 290 Hz y 430 Hz, generando distorsión en el sistema eléctrico que puede afectar tanto al motor como a la calidad de la energía. La instalación de filtros armónicos fue recomendada para mitigar estos efectos y mejorar la fiabilidad del sistema. La conclusión general es que el análisis y la implementación de un adecuado filtrado armónico mejora significativamente la calidad de la energía y prolonga la vida útil del motor síncrono. Este antecedente demuestra cómo la presencia de armónicos puede influir negativamente en los sistemas eléctricos y en la durabilidad de los componentes internos del motor, como el aislamiento del bobinado.

Chocanapi (2019) en su tesis titulada "*Implementación de un Plan de Mantenimiento para Motores de Media Tensión en la Industria Cementera,*" tuvo como objetivo general diseñar un plan de mantenimiento predictivo para mejorar la confiabilidad y prolongar la vida útil de los motores de media tensión, incluidos los motores síncronos, dentro del sector cementero. La metodología utilizada fue cuantitativa y basada en normas técnicas como la EASA AR100, IEEE 43, y la ISO 10816, incorporando análisis de vibraciones, termografía, y pruebas de aislamiento del bobinado, tales como el índice de polarización y la prueba de descargas parciales. Los resultados demostraron que un adecuado mantenimiento preventivo y predictivo, aplicado de forma sistemática, mejoró la eficiencia operativa de los motores, logrando reducir las fallas en un 40% y extender la vida útil del aislamiento del bobinado en un 30%. La conclusión principal fue que el plan de mantenimiento implementado no solo mejoró la confiabilidad de los motores, sino que también permitió reducir los costos operativos a largo plazo. Este antecedente es relevante para la investigación, ya que indica que se tiene que aplicar un mantenimiento riguroso del aislamiento del bobinado en motores eléctricos síncronos, contribuyendo a

la prolongación de su vida útil y asegurando su rendimiento en procesos industriales críticos.

Álvarez *et al.* (2023) en su artículo titulado "*Desarrollo de un banco de pruebas para el diagnóstico de fallas en el estator de un generador síncrono de imanes permanentes*", desarrollaron una plataforma experimental para identificar fallas eléctricas en el estator, particularmente cortocircuitos entre las vueltas de las bobinas. Utilizaron una metodología basada en la modificación del devanado del estator, aplicando pruebas de voltaje, corriente y resistencia en diversas condiciones operativas. Los resultados demostraron que el sistema es capaz de detectar cambios importantes en la resistencia de las fases, lo que permite identificar fallas incipientes en el aislamiento del bobinado. Concluyeron que este método es eficaz para monitorear el aislamiento, prevenir fallas mayores y prolongar la vida útil del generador. Este antecedente es valioso para la investigación, ya que subraya la relevancia de implementar diagnósticos tempranos para preservar la integridad del aislamiento en motores eléctricos síncronos, clave para su durabilidad.

Oslínger-Gutiérrez *et al.* (2024) en su artículo "*Desing methodology of roebel stator bars for salients poles synchronous generators*", tuvo como objetivo general proponer una metodología para dimensionar barras Roebel en generadores síncronos de polos salientes. La metodología fue de tipo aplicada, comparando enfoques de tres autores (Juan Corrales Martín, Karl Vogt y Aleksandr Abramov). Se aplicaron a un caso real: la barra del estator del generador de 125 MW de la Central Hidroeléctrica Salvajina. Los resultados mostraron que las metodologías permitieron una estimación precisa, con errores mínimos en comparación con el diseño real. Este antecedente es clave para la investigación, ya que valida una metodología que podría ser aplicada para evaluar la vida útil del aislamiento en motores eléctricos síncronos, proporcionando un marco robusto y detallado para futuros análisis.

El artículo de Bong et al. (2019), titulado *“A design study on 40 MW synchronous motor with no-insulation HTS field winding”*, tuvo como propósito diseñar y perfeccionar un motor síncrono de alta potencia, empleando bobinas superconductoras de alta temperatura (HTS) sin aislamiento. Para alcanzar este fin, los autores partieron de un diseño preliminar basado en los parámetros de un motor de referencia de 36.5 MW y posteriormente realizaron un proceso de refinamiento mediante simulaciones con el método de elementos finitos, lo que permitió predecir de manera más precisa el comportamiento electromecánico del motor. Los hallazgos indicaron que la respuesta de par del motor con bobinas sin aislamiento fue prácticamente equivalente a la de su versión aislada. Sin embargo, se identificaron diferencias notorias en los instantes de aceleración y desaceleración del rotor, lo que sugiere que las bobinas sin aislamiento cumplen un rol de amortiguador efectivo. Esta característica abre la posibilidad de aplicar esta tecnología en motores de baja velocidad, como los destinados a la propulsión naval. La relevancia de este antecedente para mi investigación radica en que evidencia cómo la innovación en el diseño del motor puede tener efectos directos en la durabilidad del aislamiento, aportando un punto de referencia clave para comprender las implicancias técnicas y de fiabilidad de las bobinas en motores síncronos de gran escala.

Nacionales:

Madiouni (2024) en su tesis titulada *“Comprobaciones y ensayos estáticos recomendados durante el proceso de aceptación de motores eléctricos”*, tuvo como objetivo general desarrollar un manual exhaustivo que las empresas industriales puedan emplear en el proceso de aceptación de motores eléctricos, asegurando su correcto funcionamiento. La metodología utilizada incluyó una revisión bibliográfica profunda y la realización de pruebas estáticas en motores eléctricos de laboratorio. Los resultados indicaron la relevancia de las pruebas de resistencia de aislamiento y el índice de polarización (IP) para garantizar la integridad del bobinado y prevenir fallos prematuros.

Se concluyó que una correcta evaluación y mantenimiento del aislamiento prolongan la vida útil de los motores eléctricos. Este antecedente es relevante para la investigación sobre la vida útil del aislamiento en motores eléctricos síncronos, ya que aporta procedimientos y datos técnicos clave para evaluar la calidad del aislamiento de los bobinados, lo que está directamente relacionado con su durabilidad y eficiencia operativa.

Herrera (2019) en su tesis titulada *“Elaboración de un plan de mantenimiento correctivo programado de motores eléctricos síncronos de 1250 HP para la empresa Minera – Metalúrgica Shougang Hierro Perú S.A.”*, tuvo como objetivo general diseñar un plan de mantenimiento que mejore la continuidad operativa del motor síncrono, minimizando las interrupciones en el proceso productivo. La metodología utilizada fue de tipo aplicada con enfoque cuantitativo, analizando fallos recurrentes debido a la acumulación de partículas y la degradación del aislamiento en el motor. Los resultados mostraron que un mantenimiento programado eficiente reduce los tiempos de parada y mejora la fiabilidad operativa del motor, realizando, pruebas de resistencia de aislamiento e índice de polarización (PI). La conclusión general resalta que el plan implementado mejoró la eficiencia del mantenimiento y prolongó la vida útil del motor, además de reducir costos. Este antecedente es importante para la investigación ya que muestra la importancia de mantener la fiabilidad en equipos eléctricos críticos, crucial para evaluar la vida útil del aislamiento en motores eléctricos síncronos.

Callupe *et al.* (2021) en su tesis titulada *“Caracterización de Parámetros Electromecánicos para Determinar las Fallas en Generadores Síncronos Trifásicos con Rectificador Incorporado”*, tuvieron como objetivo general determinar las fallas en generadores síncronos trifásicos mediante la caracterización de parámetros electromecánicos. La metodología fue de tipo aplicada con un enfoque experimental, realizando pruebas de rechazo de carga activa y reactiva, junto con el análisis de vibraciones y fallas en los componentes clave del generador. Los resultados indicaron

que los fallos más comunes incluyen escoriaciones y perforaciones en el eje, así como una degradación en los devanados de campo. Las pruebas de resistencia del aislamiento mostraron un desgaste progresivo a lo largo del tiempo, lo que reduce la vida útil del sistema. La conclusión principal resalta la importancia de monitorear los parámetros electromecánicos para prevenir fallas críticas en los generadores. Este antecedente es importante para la investigación, ya que ofrece información útil sobre la presente tesis.

Saico (2023) en su tesis titulada "*Aplicación del Motor Síncrono en Molinos Gearless*", tuvo como objetivo general analizar el uso de motores síncronos en la molienda minera, enfocándose en la durabilidad del aislamiento de los devanados. La metodología fue aplicada con enfoque descriptivo, donde se emplearon evaluaciones prácticas del rendimiento del motor en operación continua, monitoreando variables críticas como la temperatura y la corriente. Los resultados revelaron que un sistema de monitoreo en tiempo real y un mantenimiento adecuado del sistema de refrigeración son esenciales para preservar el aislamiento de los bobinados; estos factores prolongan la vida útil del motor y reducen la posibilidad de fallos inesperados. La conclusión resalta que, con un adecuado monitoreo y refrigeración, se puede optimizar la durabilidad del aislamiento, asegurando así una operación más fiable y segura. Este antecedente es valioso para la investigación, ya que refuerza la importancia de una gestión preventiva del aislamiento en motores críticos, lo cual es clave en la durabilidad y eficiencia operativa en entornos altamente exigentes.

Espinoza (2021) en su tesis titulada "*Implementación de un sistema de control de campo para arranque de un motor síncrono de 4000 HP*", tuvo como objetivo general modernizar el sistema de arranque del motor síncrono para mejorar su eficiencia y confiabilidad, específicamente en el aislamiento del bobinado, crucial para su vida útil. La metodología fue aplicada con un enfoque técnico, integrando un nuevo sistema de protección de campo (SPM) y un control de suministro de campo variable (VFC),

además de pruebas de arranque y resistencia del aislamiento. Los resultados mostraron que el sistema actualizado prolonga la vida útil del aislamiento, reduciendo fallas y tiempos de inactividad. La conclusión general señala que este sistema no solo protege el aislamiento del bobinado de sobrecargas térmicas y fallas de sincronización, sino que también mejora la eficiencia operativa del motor. Este antecedente es importante para la investigación porque demuestra cómo la mejora en sistemas de control y protección del aislamiento influye en la durabilidad y confiabilidad

Bernaola (2022) en su tesis titulada *“Configuración y regulación del relé de protección para arrancador síncrono de un motor de molino de bolas”*, tuvo como objetivo principal mejorar la confiabilidad operativa del motor síncrono, prolongando la vida útil del aislamiento del bobinado mediante un sistema de protección optimizado. La metodología utilizada fue de tipo técnico-operativa, realizando configuraciones en los relés de sincronismo y protección (SPM y Multilin 269), junto con pruebas de campo y simulaciones en software especializado. Los resultados demostraron una reducción significativa de los picos de corriente, estabilizando el consumo de energía en 25 A menos y asegurando un control óptimo del torque durante los arranques, contribuyendo a la durabilidad del aislamiento del motor. La conclusión general confirma que las configuraciones mejoradas reducen el desgaste en el bobinado, evitando fallas y costos asociados a paradas imprevistas. Este antecedente es relevante para la investigación al demostrar cómo el mantenimiento preventivo y el ajuste técnico adecuado son esenciales para optimizar la vida útil del aislamiento en motores eléctricos síncronos.

Guerrero (2019) en su tesis titulada *“Metodología adecuada para medir el aislamiento del devanado del estator en las unidades generadoras del Complejo Hidroenergético Mantaro”*, su objetivo fue diseñar una estrategia para evaluar el aislamiento en los estatores de generadores síncronos. El enfoque de investigación fue experimental, de tipo aplicado y correlacional, y se utilizó el equipo DOBLE M4100-DTA, siguiendo normas IEEE, para realizar pruebas como tangente delta en las instalaciones del

complejo. Los hallazgos mostraron valores del factor de potencia por debajo de los límites recomendados. La conclusión destaca la eficacia de la metodología implementada para mantener la integridad del aislamiento en generadores, reduciendo costos y riesgos operativos. Este antecedente es relevante para la investigación sobre la vida útil del aislamiento en motores eléctricos, pues evidencia la importancia de procedimientos diagnósticos para prolongar su funcionamiento sin fallas críticas.

Canchumani (2022) en su tesis titulada *“Esquema de comportamiento de motor síncrono en fallas y soluciones en el mantenimiento predictivo en la industria minera”* planteó como objetivo general diseñar estrategias de mantenimiento que optimicen la operatividad y vida útil del aislamiento en motores síncronos usados en minería, minimizando las paradas no planificadas. La metodología fue aplicada y cuantitativa, enfocándose en el análisis de condiciones operativas críticas como alta vibración y degradación del aislamiento. Los resultados mostraron que la implementación de mantenimientos predictivos y preventivos permite reducir tiempos de parada y mejorar la fiabilidad mediante el uso de puentes de bobina y ajustes de punto neutro. Se concluye que las técnicas de mantenimiento predictivo extienden significativamente la vida útil del aislamiento. Este antecedente es importante para la investigación actual sobre la vida útil del aislamiento en motores síncronos, ya que proporciona una base sólida en el monitoreo y estrategias preventivas que son cruciales para la durabilidad del aislamiento en entornos industriales.

Castillo (2018) en su tesis titulada *“Aplicación, Análisis y Diagnóstico del Monitoreo en Línea de Descargas Parciales en el Aislamiento de Motores Anillo de Gran Potencia (24.0 MW / 16.0 MW) que Accionan Molinos – Gearless Mill Drive GMD”*, el propósito general planteado fue implementar un sistema de monitoreo en tiempo real para diagnosticar el aislamiento en motores esenciales de plantas mineras, incrementando así su confiabilidad. La metodología aplicada fue cuantitativa y se centró en la medición de descargas parciales (DP) para analizar el desgaste y envejecimiento del aislamiento.

Los hallazgos indicaron que el monitoreo continuo permite prever fallas y prolongar la vida del aislamiento mediante intervenciones a tiempo. En conclusión, se destacó que el sistema de monitoreo reduce los tiempos de inactividad y previene daños graves, garantizando la continuidad operativa. Este antecedente es fundamental para la investigación, ya que respalda el monitoreo en línea como una herramienta clave en la evaluación de la vida útil del aislamiento en motores eléctricos síncronos.

Albornoz (2021) en su tesis titulada “*Aplicación del aprendizaje automático supervisado en el mantenimiento predictivo de los motores eléctricos de inducción en las empresas mineras del Perú*”, tuvo como objetivo principal determinar cómo el aprendizaje automático supervisado mejora el mantenimiento predictivo de los motores eléctricos de inducción en dichas empresas. La metodología fue aplicada, descriptiva y correlacional, utilizando un diseño preexperimental. Se recopilaron datos procesados con SPSS, donde se analizaron tres indicadores principales: nivel de aislamiento del bobinado del estator, vibraciones mecánicas, y comportamiento de la corriente del estator. Los resultados evidenciaron que la aplicación de algoritmos de aprendizaje automático permitió mejorar significativamente la fiabilidad y eficiencia del mantenimiento predictivo, comparado con métodos tradicionales. La conclusión general fue que el uso de aprendizaje automático supervisado optimizó la vida útil y rendimiento de los motores, reduciendo tiempos muertos y costos operativos. Este antecedente es relevante para la investigación sobre la vida útil del aislamiento del bobinado en motores eléctricos síncronos, ya que resalta la importancia de las técnicas avanzadas para evaluar y prolongar el estado funcional del aislamiento.

1.2 Identificación y Descripción de la Realidad Problemática

El desgaste del aislamiento en los bobinados del estator de los motores síncronos es un problema recurrente en la industria minera. Estos motores, fundamentales en procesos como la molienda, están sometidos a condiciones extremas que aceleran su deterioro.

Como consecuencia, su vida útil se reduce, aumentando el riesgo de fallas imprevistas que afectan la producción y elevan los costos operativos. (Rojas, 2010).

En un sector donde la continuidad operativa es clave, las fallas en el aislamiento del estator pueden provocar paradas inesperadas en los molinos, equipos esenciales para la molienda de minerales. Estas interrupciones no solo generan altos costos de reparación, sino también pérdidas económicas derivadas de la paralización de la producción, un problema evidenciado en diversas operaciones mineras en Perú y Chile. (Rojas, 2010).

Asimismo, un caso representativo de esta problemática es la reparación del Molino SAG 4 de Minera Escondida (Chile), ubicado en la planta concentradora Laguna Seca. Entre 2008 y 2009, este molino experimentó múltiples fallas debido a la degradación del aislamiento del estator, ocasionando detenciones prolongadas y grandes pérdidas operativas (Rojas, 2010).

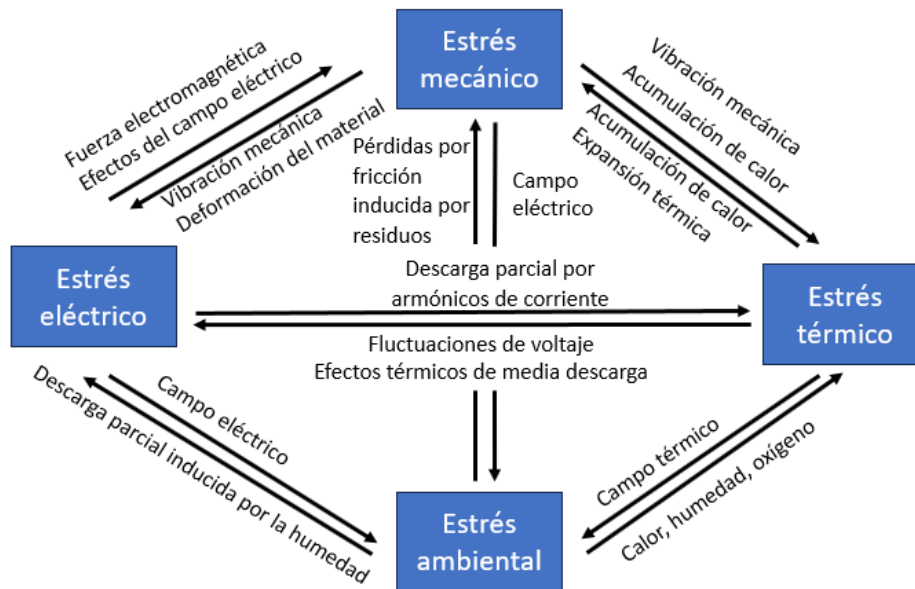
En esa misma línea de pensamiento, el presente estudio realizado en una empresa minera peruana, registró 34 fallas en cuatro motores síncronos entre 2004 y 2019, acumulando un total de 3,041 horas de inactividad, equivalentes a aproximadamente 127 días sin operación. Este tiempo sin actividad afectó los ingresos de la empresa y generó retrasos en la entrega de producción, impactando su rentabilidad.

Para evitar estos inconvenientes, es crucial adoptar estrategias preventivas que reduzcan la frecuencia de fallas y prolonguen la vida útil de los motores. La modificación del neutro del estator se presenta como una alternativa efectiva, ya que minimiza los daños en el aislamiento y mejora la confiabilidad operativa de los equipos. Un estudio realizado en la Compañía Minera Nexa Resources Atacocha S.A.A. identificó que las vibraciones anormales en los motores de los molinos de bolas eran un indicio temprano de problemas en el aislamiento, lo que demuestra la necesidad de implementar estrategias más eficaces para prolongar la durabilidad de estos componentes (Carbajal, 2024).

Si bien la industria minera ha incorporado tecnologías de monitoreo y mantenimiento predictivo, aún existen mejoras por realizar. Aplicar soluciones innovadoras como la modificación del neutro del estator no solo reduce costos a largo plazo, sino que también mejora la eficiencia energética y operativa de los motores eléctricos, garantizando estabilidad en la producción y evitando pérdidas económicas innecesarias (Carbajal, 2024).

Figura 1

Principales tensiones de degradación del aislamiento y sus interrelaciones

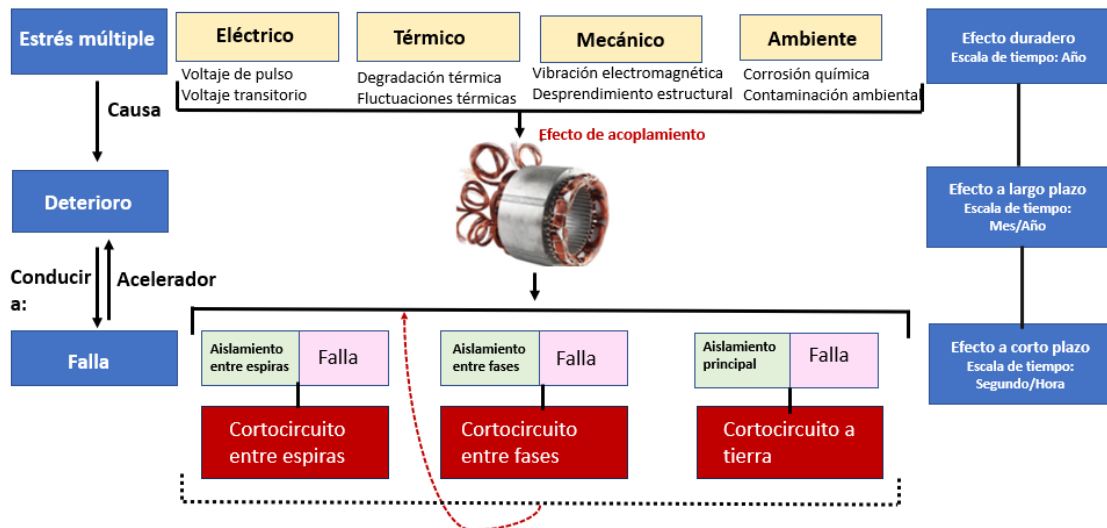


Nota: Adaptado de: Zou, Liu, & Kang, 2024. <https://doi.org/10.3390/wevj15100444>

Los principales factores que determinan la degradación del devanado en motores eléctricos síncronos de gran potencia son las tensiones eléctricas, térmicas, mecánicas y ambientales, las cuales impactan directamente en el deterioro del sistema de aislamiento. Las tensiones mecánicas inducen vibraciones y deformaciones en los componentes del estator, comprometiendo su estructura interna, tal como se observa en la figura 1.

Figura 2

Diagrama esquemático del proceso de envejecimiento del devanado del estator



Nota: Adaptado de: Zou, Liu, & Kang, 2024. <https://doi.org/10.3390/wevj15100444>

El deterioro o envejecimiento del devanado tiene las siguientes causales: estrés eléctrico, térmico, mecánico y ambiental, las cuales contribuyen al deterioro progresivo del aislamiento en motores eléctricos, incrementando el riesgo de fallos, tal como se observa en la figura 2. Estas tensiones pueden ocasionar cortocircuitos en los devanados del motor, ya sea entre vueltas, entre fases o hacia tierra, lo que deriva en daños graves. Los efectos del deterioro no son uniformes en el tiempo: algunos se manifiestan rápidamente, en cuestión de segundos u horas, mientras que otros se desarrollan de manera más lenta, afectando al aislamiento durante meses o años. Este proceso reduce tanto la duración como la confiabilidad del aislamiento, comprometiendo la operación segura y eficiente de los motores eléctricos.

1.3 Formulación del Problema

1.3.1 Problema Principal

¿De qué manera la metodología de modificación del neutro del estator incrementa la vida útil del aislamiento de motores eléctricos síncronos de gran potencia?

1.3.2 Problemas Específicos

- ✓ ¿De qué manera la inversión del neutro del estator contribuye a incrementar la vida útil del aislamiento de motores eléctricos síncronos de gran potencia?
- ✓ ¿De qué manera la modificación del neutro del estator contribuye a incrementar la vida útil del aislamiento de motores eléctricos síncronos de gran potencia?

1.4 Justificación e importancia de la investigación

- ✓ Se justifica técnicamente, porque soluciona el problema del envejecimiento del aislamiento de bobinados estatóricos de motores síncronos de gran potencia, mejorando su confiabilidad y prolongando su vida útil (Höpner & Wilhelm, 2021).
- ✓ Se justifica teóricamente, porque desarrolla un modelo matemático de predicción de la expectativa de vida del aislamiento de bobinados estatóricos de motores síncronos de gran potencia, permitiendo estimar con precisión los periodos óptimos de mantenimiento preventivo (Zou & Kang, 2024).
- ✓ Se justifica metodológicamente, porque se usa metodología de la investigación para desarrollar nuevos conocimientos generados a partir de análisis experimentales, utilizando técnicas avanzadas de monitoreo y diagnóstico en motores industriales con antecedentes de fallas recurrentes.
- ✓ Se justifica económicamente, porque se reducen los costos de mantenimiento por reparaciones correctivas, así como las pérdidas económicas por lucro cesante derivadas de la indisponibilidad de equipos críticos. Además, permite optimizar la gestión de activos industriales, incrementando la eficiencia operativa (Höpner & Wilhelm, 2021).
- ✓ Se justifica ambientalmente, porque se reduce la segregación de residuos peligrosos generados en los procesos de reparación de motores eléctricos, disminuyendo la necesidad de reemplazo de componentes y fomentando una operación más sostenible en la industria (Zou & Kang, 2024).

- ✓ Se justifica por su importancia, porque esta investigación ofrece una solución viable para la industria, optimizando el mantenimiento y prolongando la vida útil de los motores eléctricos síncronos. Además, contribuye al desarrollo de nuevos conocimientos en el ámbito académico y profesional, proporcionando herramientas técnicas y metodológicas aplicables en la formación de ingenieros y en futuras investigaciones.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo General

Determinar de qué manera la metodología de modificación del neutro del estator incrementa la vida útil del aislamiento de motores eléctricos síncronos de gran potencia.

1.5.2 Objetivos Específicos

- ✓ Determinar de qué manera la inversión del neutro del estator contribuye a incrementar la vida útil del aislamiento de motores eléctricos síncronos de gran potencia.
- ✓ Determinar de qué manera la modificación del neutro del estator contribuye a incrementar la vida útil del del aislamiento de motores eléctricos síncronos de gran potencia.

1.6 Hipótesis

1.6.1 Hipótesis General

La modificación del neutro del estator incrementará la vida útil del aislamiento de motores eléctricos síncronos de gran potencia.

1.6.2 Hipótesis Específicas

- ✓ La inversión del neutro del estator incrementará la vida útil del aislamiento de motores eléctricos síncronos de gran potencia.
- ✓ La modificación del neutro del estator incrementará la vida útil del aislamiento de motores eléctricos síncronos de gran potencia.

1.7 Variables, Dimensiones e Indicadores

1.7.1 Variables

Variable Dependiente: “Vida útil del aislamiento de motores eléctricos síncronos”

Dimensiones y sus Indicadores

➤ **Durabilidad del Aislamiento**

- ✓ Horas de operación sin fallas de los motores eléctricos síncronos.
- ✓ Disponibilidad de los molinos accionados por motores eléctricos síncronos.

Variable Independiente: “Modificación del Neutro del Estator”

Dimensiones y sus Indicadores

➤ **Inversión del Neutro**

- ✓ Tiempo de planificación para la inversión del neutro.
- ✓ Horas de ejecución para la inversión del neutro.

➤ **Modificación del Neutro**

- ✓ Tiempo de planificación para la modificación del neutro.
- ✓ Horas de ejecución para la modificación del neutro.

1.8 Metodología de la Investigación

1.8.1 Unidad de Análisis

La presente investigación tiene como unidad de análisis los motores eléctricos síncronos de gran potencia utilizados en la Planta Concentradora de Cía. Minera ANTAMINA S.A., ubicada en la región Ancash de Perú, específicamente aquellos cuyo aislamiento en los bobinados del estator presenta signos de deterioro. Estos motores desempeñan un papel clave en los procesos de molienda y, debido a las condiciones operativas extremas a las que están sometidos, experimentan un desgaste acelerado del aislamiento.

El estudio se centra en evaluar el impacto de la implementación de una metodología específica de modificación del neutro del estator con el objetivo de incrementar la durabilidad del aislamiento y optimizar la confiabilidad operativa de estos equipos en entornos de alta exigencia. La investigación considera variables críticas como la reducción de fallas, el tiempo medio entre fallas (MTBF) y aumento de vida útil de aislamiento del bobinado del estator.

El análisis incluirá datos obtenidos de los motores eléctricos instalados en la Planta Concentradora de ANTAMINA, un entorno industrial de gran demanda donde la eficiencia y la continuidad operativa son fundamentales. Se espera que los resultados permitan validar la efectividad de la metodología propuesta, proporcionando una solución técnica aplicable a otras plantas industriales con problemas similares en la degradación del aislamiento de motores eléctricos síncronos.

1.8.2 Tipo, enfoque y nivel de Investigación

Tipo de Investigación: Siguiendo a Hernández *et al.* (2018) esta investigación se clasifica como aplicada, ya que busca implementar una solución técnica específica: la modificación del neutro del estator, con el fin de incrementar la vida útil del aislamiento en motores eléctricos síncronos de gran potencia. El objetivo es generar un impacto directo y práctico en el rendimiento y durabilidad de estos equipos en entornos industriales.

Enfoque: El enfoque es cuantitativo, según Hernández *et al.* (2018) ya que la investigación se centra en la medición y análisis de variables relacionadas con el comportamiento del aislamiento tras la implementación de la modificación del neutro. Para ello, se realizarán pruebas controladas que permitan cuantificar mejoras en la vida útil del aislamiento y en la reducción de fallas.

Nivel de Investigación: El nivel es explicativo, conforme a Hernández *et al.* (2018) puesto que busca identificar y analizar las relaciones causales entre la modificación del neutro del estator y los cambios en las condiciones del aislamiento. Esto incluye la

evaluación de cómo esta intervención contribuye a reducir fallas eléctricas y mecánicas, proporcionando un entendimiento profundo de los efectos del cambio propuesto.

1.8.3 Diseño de Investigación

El diseño es experimental, de acuerdo con Hernández et al. (2018) ya que se llevará a cabo la modificación del neutro en motores seleccionados para observar y medir su impacto. Los experimentos controlados compararán el rendimiento de motores eléctricos con y sin la intervención, evaluando las diferencias en la durabilidad del aislamiento y el comportamiento operativo a lo largo de un periodo determinado.

1.8.4 Periodo de Análisis

El período de análisis, alineado con la metodología de modificación del neutro del estator, comprende 3 meses. Durante este tiempo, se llevará a cabo una evaluación integral del desempeño de los motores eléctricos síncronos de gran potencia intervenidos. Este período incluye tanto la implementación de la modificación del neutro como el monitoreo continuo de las condiciones del aislamiento bajo un entorno operativo controlado.

Los datos recopilados permitirán analizar cómo la modificación contribuye a extender la vida útil del aislamiento y a reducir las fallas eléctricas y mecánicas. Este enfoque garantiza la validación de la propuesta, optimizando el rendimiento y la confiabilidad de los motores en aplicaciones de alto impacto industrial.

1.8.5 Población y Muestra

La población de esta investigación está conformada por motores eléctricos síncronos de gran potencia utilizados en entornos industriales altamente exigentes, específicamente en la minería peruana, donde desempeñan un papel fundamental en los procesos operativos de plantas concentradoras.

La muestra seleccionada por conveniencia incluye cuatro motores eléctricos síncronos instalados en la Planta Concentradora de Cía. Minera ANTAMINA S.A. Estos motores fueron elegidos debido a su importancia operativa y a su historial de fallas relacionadas

con el deterioro del aislamiento en los bobinados estáticos. Durante el estudio, estos equipos fueron monitoreados en un período determinado, enfocándose en la evaluación del impacto de la modificación del neutro del estator sobre la vida útil del aislamiento, la reducción de fallas y la optimización de la confiabilidad operativa.

El análisis de estos motores permitirá obtener datos relevantes y aplicables a equipos de características similares, facilitando la validación de la metodología propuesta y su posible implementación en otras unidades dentro del sector minero.

1.8.6 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

Se implementaron sistemas avanzados para registrar datos críticos de los motores. Los medidores de voltaje conectados al sistema de control del molino recopilan información de forma continua, la cual es almacenada en el PI SYSTEM (*Plant Information*). Este servidor central permite consolidar y organizar datos operativos como temperatura, voltaje y corriente, que luego son exportados a Excel para su procesamiento. Este método garantiza una recolección confiable y detallada, asegurando que la información registrada sea precisa para posteriormente evaluar el desempeño del aislamiento, antes y después de la intervención propuesta.

1.8.7 Análisis y Procesamiento de Datos

La información almacenada en el PI SYSTEM fue trasladada a tablas de Excel para un análisis exhaustivo. Se aplicaron herramientas estadísticas y gráficas para identificar patrones y variaciones en las condiciones del aislamiento después de la modificación del neutro del estator. Este proceso permitió evaluar de manera clara cómo la intervención influye en la reducción de fallas y el incremento de la vida útil del aislamiento. Los resultados fueron presentados de manera estructurada, destacando las mejoras obtenidas y validando la eficacia de la metodología aplicada.

CAPÍTULO II

Marco Teórico y Marco Conceptual

2.1 Bases Teóricas

2.1.1 Motores eléctricos

Generalidades:

Los motores eléctricos convierten la energía eléctrica en energía mecánica, aprovechando los campos magnéticos que se generan en sus bobinas. Estos dispositivos están formados por dos componentes clave: el estator, que permanece fijo, y el rotor, que es impulsado por la energía para girar. Algunos motores eléctricos poseen la capacidad de funcionar en modo inverso, lo que les permite generar energía eléctrica a partir de energía mecánica, destacando así por su versatilidad en diversas aplicaciones (Zapana, 2019).

A continuación, se pueden clasificar de la siguiente manera:

A. Motores de corriente continua

Los motores de corriente continua convierten de manera eficiente la energía eléctrica en energía mecánica para una amplia variedad de aplicaciones. Para funcionar, requieren una fuente de corriente continua o un dispositivo que transforme la corriente alterna en continua. Estos motores destacan por la facilidad con la que se puede ajustar su velocidad, lo que permite un control flexible y preciso (Badarudin *et al.*, 2021).

B. Motores de corriente alterna

Son motores que necesitan una fuente de energía alterna, que generalmente se obtiene directamente de la red eléctrica. Estos motores se utilizan de manera más extendida debido a su fácil uso, bajo costo de fabricación y reducido mantenimiento. (Chai *et al.*, 2019).

- ✓ **Síncronos:** Los motores síncronos son altamente eficientes en aplicaciones que requieren grandes demandas, ofreciendo un control preciso tanto en la velocidad

como del torque bajo diferentes condiciones, por lo que funcionan a una velocidad constante, ya que no hay diferencia entre la velocidad del campo magnético y la velocidad de rotación del rotor. Generalmente cuentan con un elevado costo de fabricación, especialmente en motores de menor tamaño, y suelen emplearse en procesos donde se necesita una alta potencia (Chai *et al.*, 2019).

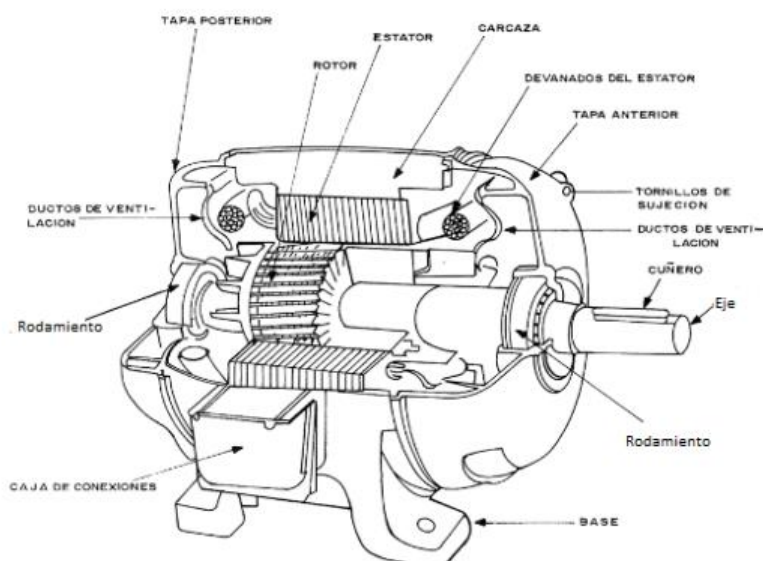
- ✓ **Asíncronos:** Los motores asíncronos funcionan a una velocidad constante, aunque presentan una pequeña diferencia entre la velocidad del campo magnético y la del rotor, la cual varía ligeramente según la carga aplicada. Gracias a su diseño simple, su gran resistencia y su bajo costo son los motores más utilizados. Además, su velocidad puede ser ajustada utilizando un convertidor de frecuencia, lo que los hace aún más versátiles en distintas aplicaciones (Bochita, 2023).

Partes de un motor eléctrico

A continuación, se describe de manera general las partes fundamentales que conforman un motor eléctrico.

Figura 3

Partes principales de un motor eléctrico



Nota: Tomado de: (Carrión Jaura, 2016, p. 6).
[https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/76696/CARRI%*c3*%93N%20-](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/76696/CARRI%c3%93N%20-)

El corte transversal de un motor eléctrico permite identificar sus componentes principales: el estator, que contiene los devanados responsables de generar el campo magnético, y el rotor, que gira dentro del estator al ser inducido por dicho campo. El eje, conectado al rotor, transmite la energía mecánica generada. También se observan los rodamientos, que permiten un giro suave y eficiente del rotor. Otros elementos importantes son la carcasa, que protege el conjunto del motor, y la caja de conexiones, donde se realizan las conexiones eléctricas necesarias para su funcionamiento, tal como se observa en la figura 3.

A. Rotor

El rotor es la parte giratoria de una máquina eléctrica, como un motor o un generador. Está formado por un eje y bobinas enrolladas sobre un núcleo magnético. Estas bobinas giran dentro de un campo magnético, que puede ser generado por imanes o por otro conjunto de bobinas en el estator, la parte fija de la máquina. Según el tipo de máquina, el rotor puede funcionar tanto con corriente continua como alterna, lo que permite convertir energía eléctrica en mecánica o, en algunos casos, convertir energía mecánica en eléctrica. (S&P, 2024).

Asimismo, el rotor es una parte crítica y fundamental de las máquinas eléctricas, cuya geometría está diseñada para la resistencia mecánica y su diseño influyen directamente en el rendimiento del motor eléctrico. (Bianchini, *et al.*, 2024).

Existen varios tipos de rotores:

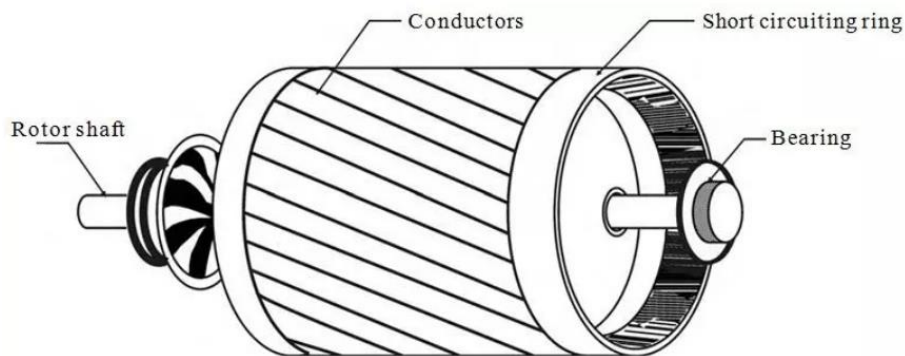
✓ **Rotor de jaula de ardilla:**

Se caracterizan por tener un diseño práctico y eficiente. Está compuesto por varias barras conductoras insertadas en ranuras talladas en su superficie, conectadas en sus extremos mediante anillos de cortocircuito. Su nombre proviene de su parecido con las ruedas de ejercicio donde corren las ardillas o hámsters. (Chapman, 2012).

Por otro lado, las fallas en las barras del rotor, como fracturas, pueden reducir la eficiencia del motor y aumentar las pérdidas de energía, por lo que es fundamental detectar estos problemas de manera temprana para garantizar un funcionamiento óptimo (Sun *et al.*, 2022).

Figura 4

Rotor of Squirrel Cage Induction Motor. (Rotor del motor de inducción de jaula de ardilla)



Nota: Tomado de: <https://www.theengineeringprojects.com/2016/10/squirrel-cage-induction-motor.html>

✓ **Rotor bobinado:** El rotor bobinado cuenta con devanados conectados a anillos rozantes montados sobre el eje. Mediante escobillas, el rotor se conecta a una resistencia ajustable, que permite un control preciso tanto de la corriente de arranque como de la velocidad del motor. Esta configuración ofrece flexibilidad y adaptabilidad, siendo ideal para aplicaciones que requieren condiciones de operación variables. (Pinheiro *et al.*, 2022).

Figura 5

Rotor bobinado



Nota: Tomado de: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/113390/Herrera%20-%20An%C3%A1lisis%20de%20la%20eficiencia%20de%20los%20motores%20de%20inducci%C3%B3n%20que%20operan%20bajo%20diferentes%20condic....pdf?sequence=1&isAllowed=y>

✓ **Rotor de polo saliente:** Un rotor de polo saliente es un tipo de rotor utilizado principalmente en máquinas síncronas. Se caracteriza por tener polos magnéticos que sobresalen de la superficie del rotor, lo que genera un campo magnético variable y un entrehierro magnético no uniforme. Este diseño es adecuado para aplicaciones de baja velocidad, como generadores en plantas hidroeléctricas y motores eléctricos de grandes dimensiones. Los polos salientes permiten un mejor control del torque a bajas velocidades y son esenciales en máquinas con un alto número de polos, ya que facilitan la producción de un campo magnético fuerte y estable. Este tipo de rotor es conocido por su alta eficiencia en operaciones que requieren estabilidad a bajas velocidades. (Hofer, *et al.*, 2019).

Figura 6

Generador síncrono de polos salientes



Nota: Tomado de: <https://www.electricity-magnetism.org/es/generador-sincrono-de-polos-salientes/>

B. Estator

Es la parte fija del motor eléctrico y tiene un papel fundamental en la generación del campo magnético necesario para el funcionamiento del motor, el cual está compuesto por una carcasa que alberga una serie de ranuras en forma de corona, hechas de chapas de acero al silicio. Estas ranuras contienen los bobinados del estator, los cuales son esenciales para la creación del campo magnético. Aunque el estator no tiene movimiento mecánico, su influencia magnética es crucial para inducir la rotación en el rotor, es así como genera la energía mecánica que impulsa el motor. Su diseño y estructura permiten una mayor eficiencia en la transmisión del campo magnético al rotor, maximizando el rendimiento del motor. (Pinheiro, *et al.*, 2022).

Figura 7

Estator de un motor de inducción con sus respectivos devanados



Nota: Tomado de: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/113390/Herrera%20-%20An%C3%A1lisis%20de%20la%20eficiencia%20de%20los%20motores%20de%20inducci%C3%B3n%20que%20operan%20bajo%20diferentes%20condic....pdf?sequence=1&isAllowed=y>

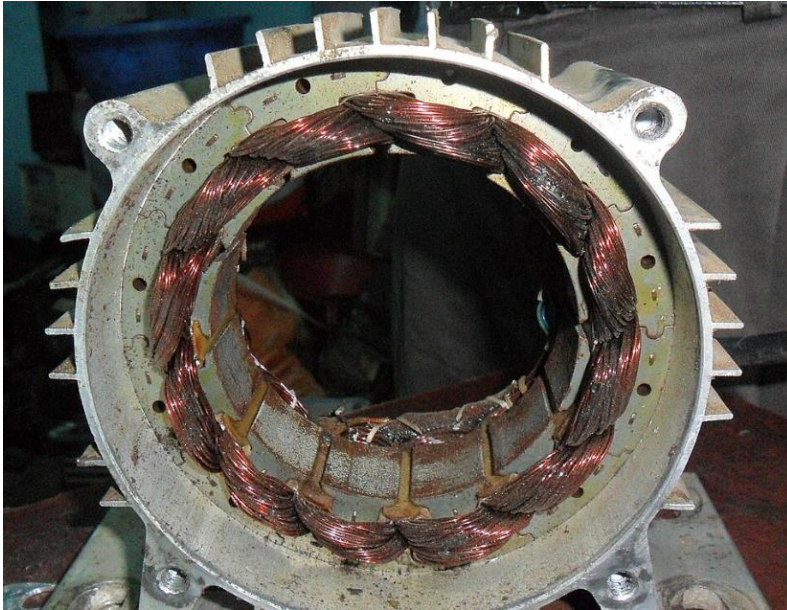
Se tienen 2 tipos de bobinados o devanados para los estatores:

✓ **Devanados aleatorios o de hilo**

Los devanados aleatorios o de hilo son utilizados en máquinas eléctricas de baja potencia, generalmente con una capacidad inferior a 400 kW y un voltaje menor a 1000 V. Este tipo de bobinado se realiza enrollando conductores de cobre aislado de forma aleatoria dentro de las ranuras del estator. Debido a esta disposición desorganizada, el flujo de corriente puede ser menos eficiente en comparación con otros tipos de bobinados, lo que es adecuado para aplicaciones donde la simplicidad y el costo son más importantes que la optimización máxima del rendimiento. Esta configuración flexible resulta más común en máquinas de menor potencia, donde no se requieren altas demandas de precisión en la distribución del campo electromagnético. (Ibrahim & Sergeant, 2022).

Figura 8

Estator de un motor de inducción trifásico



Nota: Tomado de: <https://es.wikipedia.org/wiki/Estator>

✓ **Devanados ordenados o de pletina**

Los devanados de pletina, también conocidos como devanados ordenados, se emplean en máquinas eléctricas de gran potencia y media tensión. Estos están compuestos por bobinas aisladas que se fabrican previamente con una forma precisa antes de ser instaladas en las ranuras del núcleo del estator. Este proceso de preformado garantiza un diseño meticuloso, donde las aspiraciones de las bobinas cercanas tienen una diferencia mínima de voltaje entre sí. Como resultado, se optimiza el rendimiento de la máquina, permitiendo que el flujo de corriente sea más uniforme y estable en comparación con otros tipos de bobinados. Esta característica hace que estos devanados sean especialmente adecuados para aplicaciones que exigen un control exacto y un alto nivel de eficiencia. (Ibrahim & Sergeant, 2022).

Figura 9

Devanado Preformado



Nota: Tomado de: <https://es.slideshare.net/slideshow/s16s1material-2pdf/252289584#4>

C. Eje de motores eléctricos

El eje actúa como un enlace esencial entre el motor y el impulsor, encargándose de transferir de manera eficiente la energía desde el motor o el dispositivo impulsor hacia la bomba. Para asegurar su correcto funcionamiento, debe tener un diseño adecuado que le permita soportar el torque máximo en cualquier circunstancia operativa. Esto implica considerar no solo las exigencias durante el arranque, sino también las fluctuaciones que puedan presentarse en las condiciones de trabajo y los cambios de velocidad, especialmente en aplicaciones con accionamiento. (Predictiva21, 2021).

Figura 10

El Eje del Rotor



Nota: Tomado de: <https://bdiperu.net/rotores-electricos/>

D. Rodamientos y cojinetes

Estos elementos aseguran el correcto funcionamiento del eje, reducen la fricción, prolongan la vida útil del motor y optimizan el consumo energético.

- ✓ **Cojinetes:** Los cojinetes aplican para diferentes máquinas rotativas (motores, generadores, turbinas, compresores, molinos, etc.) e internamente llevan aceite de lubricación de alta presión, asimismo, sirven de descanso del eje de la máquina rotativa en ambos extremos, esa película de aceite evita que el eje del motor haga contacto con la superficie metálica, de tal forma que el eje gire sobre el aceite a presión. (Pérez, *et al.*, 2021).
- ✓ **Rodamientos:** Los rodamientos, en especial los de alto desempeño, están fabricados para resistir tanto cargas radiales como axiales mientras se minimiza la fricción en sistemas rotativos. En las industrias, su diseño incluye mecanismos de lubricación que optimizan el flujo de aceite para reducir el desgaste superficial. Estos rodamientos ofrecen una mayor estabilidad y eficiencia en condiciones de operaciones exigentes, ayudando a disminuir los costos de mantenimiento. (Pérez, *et al.*, 2021).

Figura 11

Cojinetes y Rodamientos



Nota: Tomado de:

<https://riull.ull.es/xmlui/bitstream/handle/915/25365/DESMONTAJE%2c%20MONTAJE%2c%20VERIFICACION%20DE%20UN%20ROTOR%20DE%20UN%20MOTOR%20ELECTRICO%20Y%20ACCESORIOS.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

E. Carcasa

La carcasa cumple la función de resguardar el estator y el rotor del motor, y su material de construcción varía dependiendo del tipo de motor, su diseño y su uso específico. Además, incluye un sistema de protección que se identifica mediante un código IP (según la norma IEC), el cual determina el nivel de seguridad que ofrece ante el contacto con partes peligrosas, la entrada de objetos extraños y la penetración de agua. Además, la carcasa cuenta con aletas diseñadas para mejorar la disipación del calor y, al mismo tiempo, proporciona un soporte mecánico para el motor, albergando los cojinetes y rodamientos que permiten su correcto desempeño. (Portal, 2021).

Figura 12

Carcasa de un motor eléctrico



Nota: Tomado de:

<https://riull.ull.es/xmlui/bitstream/handle/915/25365/DESMONTAJE%2c%20MONTAJE%2c%20VERIFICACION%20DE%20UN%20ROTOR%20DE%20UN%20MOTOR%20ELECTRICO%20Y%20ACCESORIOS.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

F. Caja de conexiones

La caja de conexiones alberga los terminales de los devanados del estator, facilitando la conexión y alimentación del motor. Cada devanado tiene dos terminales, y dado que hay un devanado por fase, en un motor trifásico se encuentran seis terminales. Además

de organizar las conexiones, protegen los terminales tanto del contacto humano como de posibles daños mecánicos. Todos los motores eléctricos cuentan con una caja de conexiones diseñada para resguardar los cables de alimentación ante cualquier factor que pueda dañarlos. En su interior, hay una regleta específica que conecta los terminales del bobinado, y mediante unas láminas se realiza la conexión adecuada para el funcionamiento correcto del motor. (Portal, 2021).

Figura 13

Caja de conexiones de un motor eléctrico



Nota: Tomado de:

<https://riull.ull.es/xmlui/bitstream/handle/915/25365/DESMONTAJE%2c%20MONTAJE%2c%20VERIFICACION%20DE%20UN%20ROTOR%20DE%20UN%20MOTOR%20ELECTRICO%20Y%20ACCESORIOS.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

G. Placa de características

La placa de especificaciones de un motor trifásico proporciona información clara sobre sus condiciones de operación, el tipo de servicio que puede brindar y las medidas de precaución necesarias para su correcta manipulación.

Figura 14

Placa característica de un motor eléctrico

ABB		3-Motor M3AA 80 C 2			IE2 CE	
3GAA081313-ASE		No.		Cl.F	IP 55	
6204-2Z/C3		6203-2Z/C3		11 kg		
V	Hz	r/min	kW	A	Cos φ	
230 D / 400 Y	50	2870	1,10	4,30 / 2,50	0,78	
460 Y	60	3485	1,10	2,20	0,75	
IE2-50Hz-80,9(100%)-81,7(75%)-79,8(50%)						
IE2-60Hz-82,8(100%)			2017	IEC 60034-1		

Nota: Tomado de:

<https://riull.ull.es/xmlui/bitstream/handle/915/25365/DESMONTAJE%2c%20MONTAJE%2c%20VERIFICACION%20DE%20UN%20ROTOR%20DE%20UN%20MOTOR%20ELECTRICO%20Y%20ACCESORIOS.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

2.1.2 Fallas comunes en los motores eléctricos

Los motores eléctricos pueden experimentar una amplia variedad de fallas que reducen su óptimo desempeño, así como también contribuyen con los avances tecnológicos en las industrias, es por ello que resulta relevante identificar estos problemas para garantizar su durabilidad y eficiencia operativa. Las fallas suelen dividirse en dos grandes categorías: eléctricas y mecánicas. No obstante, factores externos como las altas temperaturas, la humedad excesiva o las vibraciones continuas también pueden generar daños en componentes esenciales, como el sistema de aislamiento, que va en detrimento de su capacidad para operar de manera confiable y segura. (Faria, *et al.*, 2020).

A continuación, los tipos de fallas:

A. Fallas Eléctricas

Las fallas eléctricas en motores de inducción suelen deberse al deterioro del aislamiento de los devanados, causado por sobrecargas prolongadas, sobrevoltajes y subvoltaje. Estas condiciones generan sobre calentamiento interno que reduce la eficiencia del motor y aumentan las pérdidas eléctricas. Además, pueden ser provocadas por malas

conexiones, fusibles defectuosos, o desajustes en los sistemas de protección, como la calibración incorrecta o terminales en mal estado. (Murillo-Soto, 2018).

B. Fallas mecánicas

Se manifiestan a través de vibraciones excesivas, incremento en la temperatura de operación y ruidos anormales. Estas señales suelen originarse debido a una desalineación del rotor, desgaste, fricción o bases de montaje defectuosas. Problemas en la lubricación de los cojinetes y ajustes incorrectos en las piezas del motor también contribuyen a estas fallas. Es crucial no solo vigilar las condiciones eléctricas del motor, sino también asegurar que los componentes mecánicos funcionen correctamente. Además, el sobrecalentamiento por falta de ventilación o desequilibrio operativo incrementa las temperaturas internas, lo que afecta su rendimiento. (Murillo-Soto, 2018).

2.1.3 Aislamiento eléctrico

Materiales de aislamiento eléctrico:

Los materiales de aislamiento eléctrico o *electrical insulating materials* (EIM) son materiales adecuados para proporcionar aislamiento eléctrico entre piezas a diferentes voltajes. Puede ser sólido, líquido o gaseoso. (WEG, s.f.).

Sistema de aislamiento

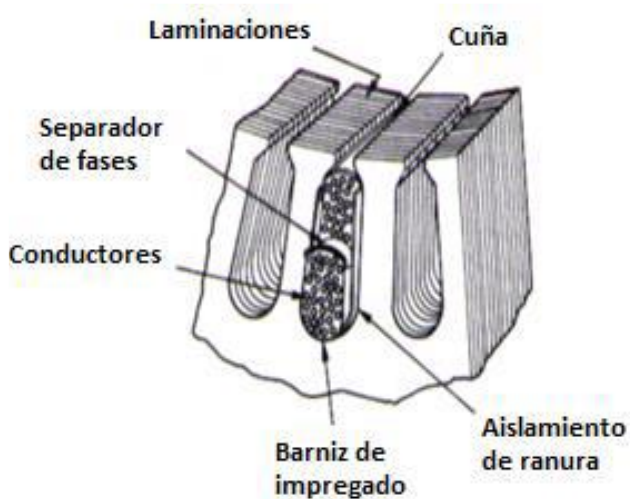
Un sistema de aislamiento en motores eléctricos está compuesto por la combinación de diversos materiales aislantes que trabajan en conjunto para proteger el bobinado y garantizar su funcionamiento seguro. Entre estos componentes se encuentran el esmalte que recubre el alambre, el aislamiento que cubre el fondo y cierre de las ranuras, así como el aislamiento entre fases. Además, se emplea barniz o resina de impregnación para mejorar la protección, junto con el aislamiento de los cables de conexión y puntos de soldadura. (WEG, s.f.).

La resistividad, hace referencia a las características de cada material para impedir el paso de una corriente eléctrica, en un material aislante, la resistividad generalmente

supera los $10^{10} \Omega\text{m}$. Lo que indica que no permiten el flujo de corriente eléctrica con facilidad. En contraste, los materiales conductores presentan una resistividad bastante menor, alrededor de $10^{-5} \Omega\text{m}$, que equivale a $0.00001 \Omega\text{m}$. (Hualpa, 2018).

Figura 15

Sistema de aislamiento



Nota: Tomado de: <https://vyphidroasesores.com/medicion-de-resistencia-de-aislamiento-en-motores-electricos-aplicacion-a-las-bombas-centrifugas/>

Los sistemas de aislamiento en máquinas de media tensión están compuestos por una combinación precisa de materiales diseñados para proteger los devanados del motor y garantizar un funcionamiento seguro. En estos sistemas, la mica o el Nomex actúan como barreras aislantes, mientras que materiales como el vidrio, el papel o el poliéster proporcionan soporte estructural, asegurando que el aislamiento mantenga su integridad en condiciones operativas exigentes. La resina epoxi, por su parte, cumple un papel crucial al unir todos estos elementos, proporcionando cohesión y resistencia a lo largo del tiempo. (Castro, 2014).

Durante la fabricación de las bobinas, es usual utilizar dos métodos. En el primero, se emplean cintas que ya contienen resina, lo que simplifica el proceso de ensamblaje. En el segundo, más elaborado pero efectivo, se utilizan cintas porosas que, después de ser encintadas, se sumergen en resina y luego se curan para obtener un aislamiento mucho

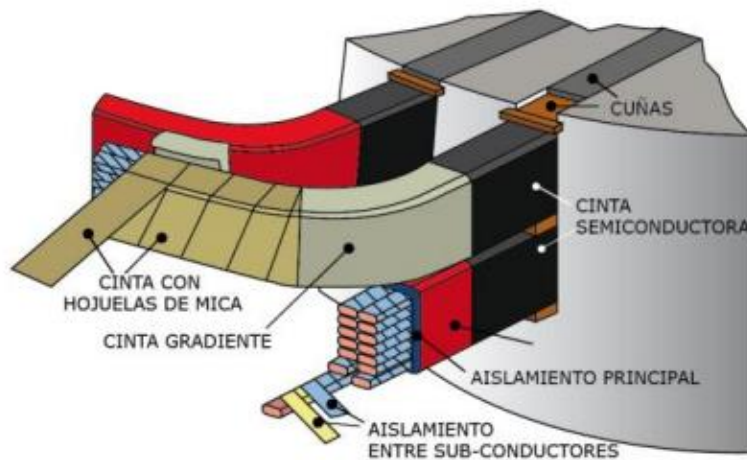
más robusto y duradero. Aunque el primer método es más rápido y económico, el segundo tendrá un rendimiento superior, siendo ideal para entornos donde la confiabilidad y la longevidad son esenciales. Así, la elección del proceso de fabricación es una cuestión de equilibrio entre eficiencia y calidad a largo plazo. (Castro, 2014).

Estructura

El aislamiento en motores de media tensión es importante para su eficiencia y seguridad. Las bobinas, compuestas por entre dos y doce espiras o sub conductores formadas por conductores aislados individualmente, minimizan las pérdidas eléctricas. Un aislamiento externo adicional, conocido como muro aislante, refuerza la protección del sistema. (Castro, 2014).

Figura 16

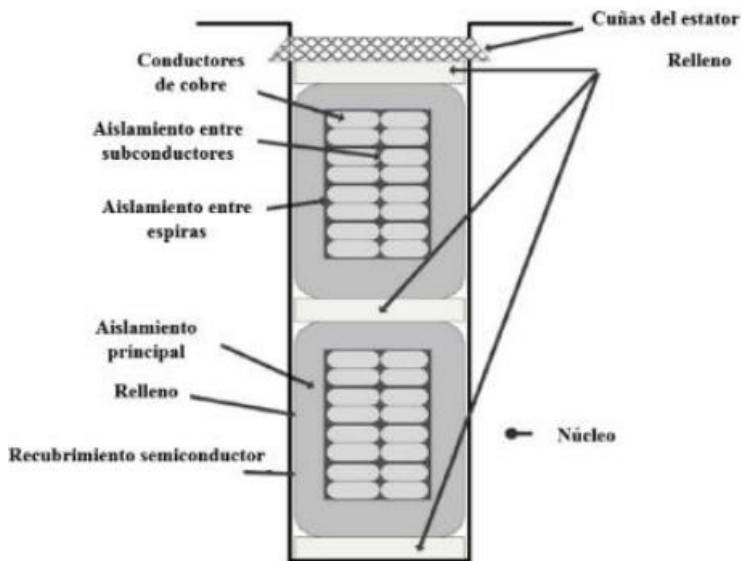
Barras tipo Roebel



Nota: Tomado de: <https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/server/api/core/bitstreams/c32598dd-8f18-4497-8670-c056d07f620c/content>

Figura 17

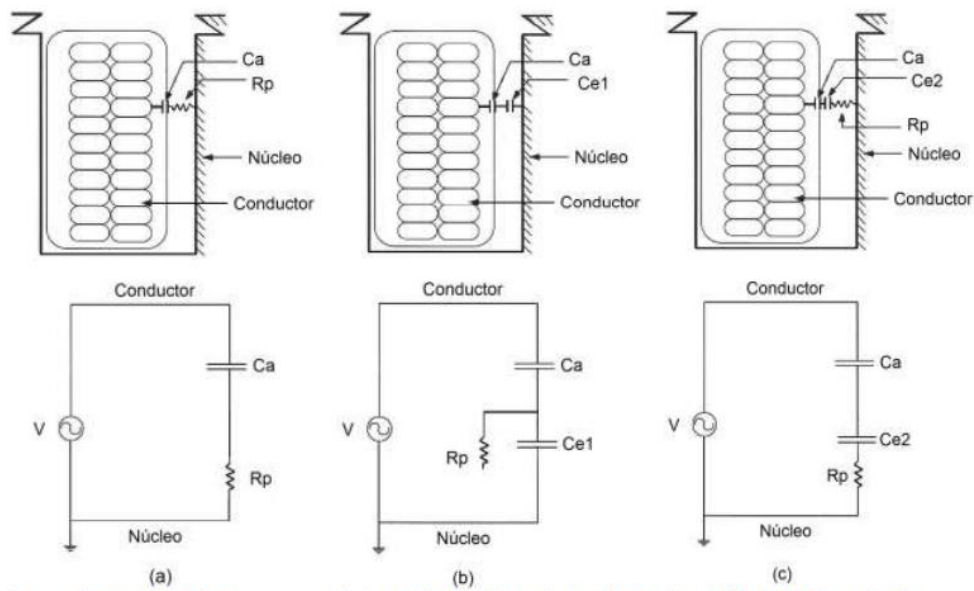
Bobinas preformadas



Nota: Tomado de: <https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/server/api/core/bitstreams/c32598dd-8f18-4497-8670-c056d07f620c/content>

Figura 18

Circuito equivalente del aislamiento en bobinas



Ca: capacitancia del aislador
 Rp: resistencia superficial de la pintura conductora
 Ce1: capacitancia del espacio con aire entre la superficie de la bobina y el núcleo
 Ce2: capacitancia del espacio con aire entre la superficie de la bobina y la pintura conductora

Nota: Tomado de: https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642016000500020

Funciones

El material aislante tiene como función principal impedir, regular y canalizar el flujo de corrientes eléctricas. Su objetivo es prevenir que la corriente escape desde un conductor eléctrico hacia la tierra o hacia un punto de menor potencial. Además, proporciona soporte estructural, resguarda al conductor frente a factores ambientales que puedan deteriorarlo y contribuye a disipar el calor hacia el entorno. (Hualpa, 2018).

Para lograr este propósito, es fundamental crear un sistema de aislamiento pensado detalladamente, teniendo en cuenta su rendimiento y su capacidad para adaptarse a diversos ámbitos y necesidades:

✓ Eléctrico

En el ámbito eléctrico, es importante que los aislantes cumplan con su función de manera segura, evitando cortocircuitos tanto entre los conductores como con la conexión a tierra. Lo que significa que deben ser materiales resistentes, capaces de soportar no solo las tensiones normales del día a día, sino también pruebas más exigentes, como las establecidas en normas reconocidas, por ejemplo, la UNE-EN 60034-1. Donde estos estándares aseguran que los aislantes sean confiables incluso en condiciones extremas, priorizando siempre la seguridad y el buen funcionamiento. (Hualpa, 2018).

✓ Térmico

En el aspecto térmico, es importante que el aislante pueda disipar el calor generado por las pérdidas de energía debido al efecto Joule, dirigiéndolo de manera eficiente hacia el sistema de refrigeración. La capacidad del aislante para soportar altas temperaturas está definida por su Clase Térmica, que establece la temperatura más alta que puede tolerar en su punto más caliente. Esto no solo asegura un desempeño seguro y confiable, sino que también protege los componentes, prolongando su vida útil. (Hualpa, 2018).

✓ **Mecánico**

Los materiales aislantes utilizados en maquinaria deben ser altamente resistentes y duraderos para afrontar las exigencias que enfrentan tanto durante su fabricación como en su funcionamiento diario. Esto incluye la capacidad de resistir fuerzas centrífugas, los cambios de tensión provocados por la expansión y contracción de los materiales, así como las vibraciones originadas por la interacción magnética entre los conductores y los núcleos. Estas características garantizan que la maquinaria opere de manera confiable y segura, incluso bajo condiciones extremas y demandas rigurosas. (Hualpa, 2018).

Además de los requisitos principales que garantizan el desempeño eficiente de un aislante, existen otras características que, aunque suelen considerarse complementarias, son igualmente esenciales para su correcto funcionamiento. Por lo que, estas propiedades adicionales refuerzan la eficiencia del material:

✓ **Fisicoquímicos**

La humedad puede comprometer gravemente las propiedades de los materiales aislantes, disminuyendo tanto su capacidad de soportar tensiones eléctricas como su resistencia al paso de corriente. Para prevenir estos efectos negativos, en ciertas situaciones es posible incorporar aislamientos especialmente diseñados para enfrentar la humedad, dotados de propiedades que les permitan mantener su eficacia incluso en condiciones adversas. (Hualpa, 2018).

✓ **Ambientales**

Las máquinas pueden estar expuestas a una variedad de condiciones ambientales que dependen de su ubicación y uso. Entre las principales amenazas se incluyen la contaminación del aire, la acumulación de polvo y suciedad, la presencia de agua y la acción de sustancias químicas corrosivas. Estas situaciones son especialmente críticas en lugares como plantas petroquímicas, zonas costeras o industrias con alta presencia de agentes químicos en el entorno. (Hualpa, 2018).

Clasificación

A continuación, clases de aislamiento de acuerdo con la norma EN 60034-18-1:2010.

Tabla 1

Sistema de aislamiento

Clase de aislamiento	Y	A	E	B	F	H	C
Temperatura límite (°C)	90	105	120	130	155	180	>180

Nota: Tomado de: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/113486/HUALPA%20JOHANA-%20APLICACION%20EN%20ENSAYOS%20OFF%20LINE.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

Pérdidas y calentamiento

Khowja, *et al.*, (2024). En su artículo, analizan cómo el calor y el envejecimiento térmico afectan los aislamientos eléctricos en cables de alta temperatura, como los fabricados con poliamida (Enduro Temp 260+) y PEEK. A través de pruebas de envejecimiento acelerado, observaron que temperaturas superiores al índice térmico provocan delaminación y formación de vacíos de aire en las capas aislantes, lo que incrementa las pérdidas por polarización y conducción, disminuyendo la eficiencia. Además, el material PEEK mostró mayor degradación frente a condiciones extremas en comparación con el Enduro Temp, evidenciando su vulnerabilidad.

Por otro lado, las pérdidas y el calentamiento en los generadores síncronos de alta velocidad tienen un impacto crítico en los aislamientos eléctricos y la eficiencia operativa. Las pérdidas se clasifican en magnéticas, eléctricas y mecánicas, incrementándose considerablemente con la velocidad de rotación. Las pérdidas eléctricas, que se derivan del efecto Joule, junto con efectos adicionales como el pelicular y el de proximidad, generan un gran aumento del calor en los conductores. En ese sentido, las pérdidas magnéticas, que incluyen las de histéresis y corrientes parásitas, se relacionan con el cuadrado de la frecuencia y la inducción magnética, lo que exige el uso de materiales especializados de bajo espesor y alta resistencia térmica. Además, las pérdidas mecánicas, causadas por la fricción con el aire y el desgaste en

los rodamientos, amplifican el incremento de temperatura, afectando directamente la integridad de los aislamientos eléctricos, la resistencia de los devanados y los imanes permanentes. Esto subraya la necesidad de sistemas de refrigeración efectivos y un diseño meticuloso para mitigar estos efectos térmicos y garantizar la confiabilidad del sistema (Martínez & Andrada, 2017).

Según lo indicado, las normativas UNE 21-305 y UNE EN 60034-1-2005 fijan límites de temperatura para los devanados y componentes de una máquina, basándose en una temperatura ambiente de referencia y la resistencia máxima de los aislantes:

Tabla 2

Clases térmicas para un aislante según norma EN 60034-18-1-2010

Clase	Definiciones y Ejemplos Ilustrativos	Temperatura Máxima (°C)
A	Son aislamientos constituidos por materiales fibrosos en base a celulosa o seda, impregnados con líquidos aislantes.	105
E	Son aislamientos en base a fibras orgánicas sintéticas.	120
B	Son aislamientos formados por materiales en base a poliéster y poliamida aglutinados con materiales orgánicos o impregnados con estos.	130
F	Son aislamientos formados por materiales en base a fibra de mica, amianto y fibra de vidrio aglutinados con materiales sintéticos, como siliconas, poliésteres o epóxidos.	155
H	Son aislamientos formados por materiales en base a mica, amianto o fibra de vidrio aglutinados con siliconas de alta estabilidad térmica.	180
200	Son aislamientos formados por materiales en base a mica, vidrio, y cerámica.	200
220	Son aislamientos formados por materiales en base a mica, vidrio, cerámica, etc., poliamida tipo Kapton.	220
250	Son aislamientos formados por materiales en base de mica, vidrio, cerámica, poliamida tipo Kapton.	250

Nota: Adaptado de: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/113486/HUALPA%20JOHANA-%20APLICACION%20EN%20ENSAYOS%20OFF%20LINE.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

Causas de degradación

✓ **Estrés térmico (Thermal Stress)**

El estrés térmico representa una de las causas más comunes del deterioro progresivo del aislamiento, culminando en el deterioro completo. Por ello, es imprescindible analizar la capacidad de los sistemas de aislamiento de los bobinados para resistir las tensiones generadas por el calor. Este estrés se produce debido a la temperatura operativa del bobinado, que se origina principalmente por las pérdidas resistivas (I^2R), las corrientes

de Foucault y las pérdidas por carga dispersa en los conductores de cobre. Además, se añade el calor generado por pérdidas en el núcleo, la fricción con el aire y otros factores externos. (Stone *et al.*, 2004).

Asimismo, los aislamientos modernos, cuando operan a temperaturas superiores a un cierto umbral, experimentan reacciones químicas como la oxidación en máquinas con enfriamiento por aire. Este proceso químico deteriora las propiedades del aislamiento, volviéndolo frágil y, en muchos casos, provocando delaminación en las paredes de tierra de las bobinas formadas. La delaminación ocurre cuando las capas de cinta de la pared de tierra se separan, lo cual se debe a la pérdida de adherencia o al deterioro del compuesto impregnado, comprometiendo gravemente la estabilidad y durabilidad del sistema de aislamiento. Este fenómeno no solo afecta la eficiencia del sistema, sino que también incrementa el riesgo de fallas catastróficas en las máquinas eléctricas. (Stone *et al.*, 2004).

Fórmula estrés térmico

$$L = A \cdot e^{B/T} \quad (1)$$

Nota: Tomado de: Stone, G. C., Boulter, E. A., Culbert, I., & Dhirani, H. (2004). *Electrical insulation for rotating machines: Design, evaluation, aging, testing, and repair*. IEEE Press.

Como se aprecia en la fórmula de estrés térmico, Dakin propuso por primera vez que la vida útil del aislamiento (L, en horas) está relacionada con la temperatura (T, en °K) mediante $L = Ae^{B/T}$, donde A y B son constantes. (Stone *et al.*, 2004).

✓ **Estrés Mecánico (*Mechanical Stress*)**

El estrés mecánico tiene tres fuentes principales que afectan el sistema de aislamiento. En los rotores, una alta fuerza centrífuga somete al aislamiento a presión constante que puede aplastarlo o distorsionarlo. Este tipo de fuerza, al no ser vibratoria, no produce desgaste con el tiempo, ya que algunos materiales pueden experimentar un fenómeno conocido como "flujo en frío," donde el material se desplaza lentamente desde las áreas de mayor presión, lo que puede causar fallas. Por otro lado, las corrientes de frecuencia

de potencia generan una fuerza magnética oscilante al doble de la frecuencia que puede hacer vibrar las bobinas en las ranuras del estator si estas no están bien ajustadas. Este movimiento causa fricción que desgasta el aislamiento, un efecto que también puede ocurrir en los extremos del devanado si las bobinas o barras se mueven entre sí o contra soportes y anillos de bloqueo. (Stone *et al.*, 2004).

Por otro lado, existe una tercera fuente de estrés mecánico que son los transitorios, como el arranque de motores o la sincronización fuera de fase de máquinas síncronas, los cuales generan corrientes transitorias que pueden ser hasta cinco veces mayores que las normales. Esto da lugar a fuerzas mecánicas hasta 25 veces superiores a las de operación habitual, lo que puede doblar las bobinas o barras en los extremos del devanado y ocasionar grietas en el aislamiento. Con el tiempo, arranques frecuentes o transitorios repetidos pueden aflojar los extremos del devanado, permitiendo movimientos que desgastan el aislamiento de manera gradual. Aunque no existen modelos estándar que relacionen el nivel de los transitorios con el número de eventos que el sistema puede soportar, los fabricantes evalúan las posibles fuerzas y diseñan los componentes para soportar transitorios individuales, sin tomar en cuenta efectos acumulativos o envejecimiento. (Stone *et al.*, 2004).

Otra fuente de estrés mecánico es la pérdida de tensión mecánica en los espárragos y pernos de sujeción del núcleo o paquete magnético del estator, que eventualmente puede provocar desplazamientos tangenciales de las primeras láminas de acero silicoso, haciendo efecto de corte transversal al espesor del aislamiento de las bobinas en el cuello de las ranuras del estator, por donde salen y se forman las cabezas de las bobinas.

✓ **Estrés Eléctrico (*Electric Stress*)**

Este estrés se deriva de las sobretensiones producto de perturbaciones de red, maniobras con los interruptores de potencia y conmutación de los dispositivos de estado sólido de los accionamientos electrónicos (arrancadores suaves, variadores de

frecuencia, cicloconvertidores, etc.), que finalmente producen agrietamientos y laminación de los aislamientos del bobinado.

El estrés eléctrico tiene una influencia mínima en el deterioro del aislamiento en los bobinados del estator que operan por debajo de 1000 V. En estos casos, y también en los bobinados del rotor, el grosor del aislamiento se determina principalmente por razones mecánicas, asegurando que sea lo suficientemente fuerte para resistir las exigencias del bobinado y las fuerzas mecánicas generadas durante el funcionamiento del equipo. (Stone *et al.*, 2004).

Por otro lado, en los bobinados del estator con clasificaciones superiores a 1000 V, el grosor del aislamiento está condicionado principalmente por el estrés eléctrico, que corresponde a la relación entre el voltaje nominal y el espesor del aislamiento. Cuando ocurren descargas parciales (PD), pequeñas chispas eléctricas dentro de bolsas de aire o en la superficie del aislamiento, estas dañan gradualmente los materiales orgánicos como poliésteres, asfaltos y epoxis, rompiendo enlaces químicos fundamentales, como el carbono-hidrógeno. Con el tiempo, este proceso erosiona las capas orgánicas del aislamiento, lo que puede resultar en fallas críticas en el sistema eléctrico. (Stone *et al.*, 2004).

Fórmula estrés eléctrico

$$L = c \cdot E^{-n} \quad (2)$$

Nota: Tomado de: Stone, G. C., Boulter, E. A., Culbert, I., & Dhirani, H. (2004). *Electrical insulation for rotating machines: Design, evaluation, aging, testing, and repair*. IEEE Press.

Explicación: Esta fórmula del estrés eléctrico se aplica en presencia de descargas parciales. El impacto del nivel de estrés eléctrico (E expresado en kV/mm) sobre la vida útil del aislamiento (L, en horas) se representa comúnmente a través del modelo de potencia inversa. Donde *c* es una constante y *n* se denomina la constante de la ley de potencia. (Stone *et al.*, 2004).

✓ Entorno ambiental (*Ambient Stress*)

El estrés ambiental, hace referencia a un conjunto de factores provenientes del entorno que rodea al motor o generador y que pueden provocar fallas. Algunos de estos factores incluyen: (Stone *et al.*, 2004).

- ✓ Humedad condensada en los bobinados.
- ✓ Aceite proveniente de los rodamientos o del sistema de sellado de aceite en máquinas enfriadas por hidrógeno.
- ✓ Alta humedad ambiental.
- ✓ Productos químicos agresivos.
- ✓ Partículas abrasivas en el aire o en el hidrógeno de enfriamiento.
- ✓ Partículas provenientes del desgaste de zapatas de freno (si están instaladas) o del desgaste de escobillas de carbón (si están presentes) dentro de la máquina.
- ✓ Suciedad y escombros introducidos en la máquina desde el ambiente, como insectos, cenizas volantes, polvo de carbón y polvos que son subproductos de procesos industriales asociados (cemento, pulpa, residuos químicos, etc.).
- ✓ Radiación. (Stone *et al.*, 2004).

2.1.4 Motores síncronos de gran potencia

Concepto

Los motores síncronos destacan por su capacidad de operar a una velocidad fija, siendo esto fundamental en aplicaciones que exigen alta estabilidad. En estos motores, la velocidad del rotor se sincroniza con la frecuencia de la corriente eléctrica utilizada, siendo así ideales para procesos industriales que exigen precisión en la velocidad de operación. (Chapman, 2012, p. 208).

Asimismo, la fórmula es la siguiente:

Fórmula de Velocidad síncrona

$$n_s = \frac{120 * f}{p} \quad (3)$$

Nota: Tomado de: Wildi, T. (2014). *Electrical Machines, Drives, and Power Systems* (6th ed.). Pearson Education Limited. ISBN: 978-1-292-02458-5.
<https://mrce.in/ebooks/Electrical%20Machines,%20Drives,%20&%20Power%20Systems%206th%20Ed.pdf>

Donde:

- n_s es la velocidad sincrónica en revoluciones por minuto (RPM),
- f es la frecuencia de la fuente de alimentación en hercios (Hz),
- p es el número de polos del motor.

Esta relación indica que la velocidad sincrónica es directamente proporcional a la frecuencia de la alimentación eléctrica e inversamente proporcional al número de polos del motor.

Los motores síncronos tienen dos tipos de rotores, de polos salientes, para aplicaciones de baja velocidad, y de polos lisos, para aplicaciones de alta velocidad, siendo foco de estudio los motores eléctricos síncronos de polos salientes.

Principio de funcionamiento

Cuando la corriente directa I_f fluye a través del devanado de campo ubicado en el rotor, genera un campo magnético estacionario conocido como B_R . Al mismo tiempo, el estator recibe alimentación de una fuente trifásica de voltaje, lo que produce corrientes alternas en sus devanados. Estas corrientes trifásicas generan un campo magnético rotacional uniforme, denominado B_s . Esto da lugar a la coexistencia de dos campos magnéticos en la máquina. (Vega, 2019).

Para que el sistema entre en funcionamiento, es crucial que el campo generado por el rotor se sincronice con el del estator. Dado que el campo magnético del estator está en constante movimiento, el campo del rotor tiende a ajustarse de manera continua para

mantener esa alineación. Es importante mencionar que, cuanto mayor sea el ángulo entre ambos campos, llegando a un máximo de 90°, mayor será el par que actúa sobre el rotor, lo que influye directamente en el desempeño de la máquina. (Vega, 2019).

Métodos de arranque

Existen tres métodos utilizados en el arranque seguro de motores:

- ✓ **Arranque en Vacío:** Este método utiliza un motor auxiliar, como uno asíncrono o de corriente continua, para alcanzar una velocidad cercana a la síncrona antes de conectar el motor principal que facilita la sincronización y evita impactos mecánicos o eléctricos. (León, *et al.*, 2015).
- ✓ **Arranque como Asíncrono:** Se añade un devanado en jaula de ardilla sobre los polos del motor. Durante el arranque, el devanado de excitación se cierra mediante una resistencia, que regula la corriente evitando daños por sobrecalentamiento. (León, *et al.*, 2015).
- ✓ **Reducción de Frecuencia Eléctrica:** Empleando dispositivos como ciclo convertidores o rectificadores-inversores, se reduce la frecuencia del suministro eléctrico al arranque, lo que permite que el rotor acelere progresivamente hasta alcanzar la sincronización con el campo magnético. Una vez sincronizado, la frecuencia se incrementa a los niveles operativos. (León, *et al.*, 2015).
- ✓ **Motores de Reluctancia Variable y Motores con Imán Permanente:** En el caso de los motores síncronos con imanes permanentes, el rotor gira sincrónicamente con el campo magnético, asegurando estabilidad y precisión desde el inicio. Por otro lado, los motores de reluctancia variable no emplean imanes ni escobillas, simplificando su estructura y mantenimiento. (León, *et al.*, 2015).

Aplicaciones y ventajas

Los motores síncronos son una solución eficiente y confiable en una amplia gama de aplicaciones industriales por lo que su capacidad para operar a velocidades constantes y su alto rendimiento los convierten en una elección preferida en sectores como la

generación de energía eléctrica, la minería, las cementeras, la siderurgia y la petroquímica. Entre sus aplicaciones más comunes se encuentran aquellas que requieren un control preciso de velocidad, así como en sistemas que buscan optimizar el consumo energético y mejorar la estabilidad de la red eléctrica. (Quispe, 2021).

Sus principales ventajas son las siguientes:

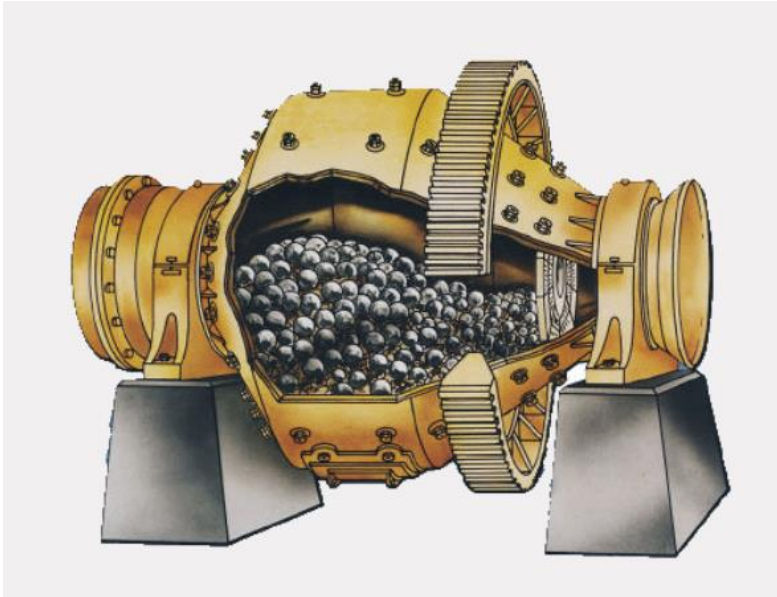
- ✓ Optimización del factor de potencia.
- ✓ Mantenimiento de velocidad constante.
- ✓ Alta eficiencia energética.
- ✓ Fiabilidad en aplicaciones exigentes. (Quispe, 2021).

Molinos

Los molinos son máquinas indispensables en el mundo de la minería y cementeras, ya que permiten convertir el mineral extraído en partículas más pequeñas y manejables lo que permite seguir con los procesos que llevarán a la obtención de metales de alto valor. Representan un punto clave para asegurar que el material cumpla con los estándares necesarios para su transformación. En su interior, enormes fuerzas trabajan en armonía para triturar y pulverizar el material, respetando sus propiedades esenciales. Los distintos tipos de molinos y su tecnología se adaptan a las necesidades y capacidades de cada operación, integrando tanto innovación como confiabilidad en su diseño. (Vega, 2019).

Figura 19

Molienda de Bolas



Nota. Tomado de: <https://carbosystem.com/como-funciona-un-molino-de-bolas/>

2.1.5 Accionamiento para molinos

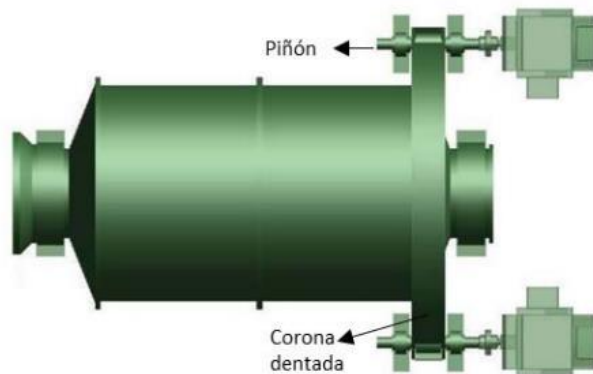
Los molinos son equipos mecánicos que para ser accionados requieren de uno o dos motores eléctricos, normalmente síncronos, que muchas veces requieren control de velocidad variable para el proceso. Los tipos de accionamiento empleados usualmente para molinos de bolas y SAG son:

A. Accionamiento mediante piñón corona

Uno o dos motores eléctricos tienen acoplados sus respectivos piñones que transmiten potencia a una corona o engranaje perimetral de gran diámetro del tambor del molino, para generar movimiento. La relación de reducción entre el piñón y corona permite una gran reducción de velocidad, con lo que se obtiene una baja velocidad de giro en los molinos. Su potencia podría alcanzar hasta los 15 MW.

Figura 20

Configuración Americana



Nota: Tomado de: http://opac.pucv.cl/pucv_txt/txt-9000/UCC9380_01.pdf

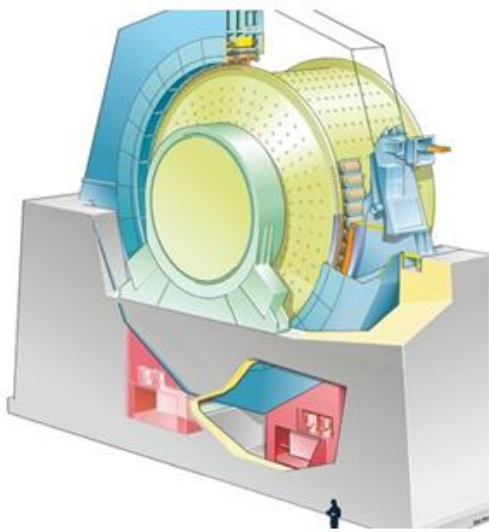
La configuración americana es considerada la mejor porque no necesita un reductor de velocidad, lo que simplifica el sistema y reduce el mantenimiento. Además, usa motores síncronos que funcionan bien a bajas velocidades y un embrague de aire que facilita el arranque. Esto la hace más eficiente, duradera y práctica para operar molinos.

B. Accionamiento mediante motor anillo y cicloconvertidor

En este tipo de sistema, el rotor del motor se conecta directamente al tambor del molino, replicando el principio de funcionamiento que antes se lograba mediante la corona. El estator, debido a su gran tamaño, tiene un diseño en forma de anillo y se fija de manera estable a la estructura base. Para controlar la velocidad del molino, se emplea un cicloconvertidor que modifica la frecuencia de la red eléctrica estándar (50 Hz o 60 Hz, según el país) a valores más bajos, permitiendo así que el molino opere a bajas velocidades de manera eficiente.

Figura 21

Molino SAG



Nota: Tomado de: <https://es.slideshare.net/slideshow/abb-molinosag/120624484>

C. Accionamiento mediante variador de velocidad

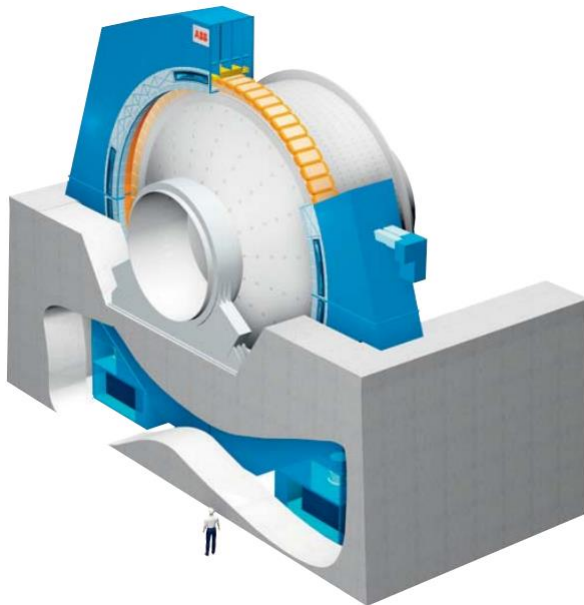
Para potencias bajas, en ocasiones se utiliza un variador de velocidad de frecuencia variable.

Accionamiento de molino sin engranajes

El sistema de accionamiento sin engranajes (GMD) de ABB es una solución tecnológica que transforma el molino en parte del motor, eliminando componentes tradicionales como coronas y piñones. El cual fue introducido en 1969, con un diseño que ha demostrado ser una herramienta confiable y eficiente para la molienda de minerales, adaptándose a condiciones extremas como altas temperaturas y altitudes. Su tecnología permite controlar con precisión el proceso de molienda, reduciendo el desgaste y los costos operativos. Además, el uso de cicloconvertidores y sistemas avanzados de monitoreo asegura una operación estable y prolongada (ABB, 2010).

Figura 22

Accionamiento de molino sin engranajes GMD

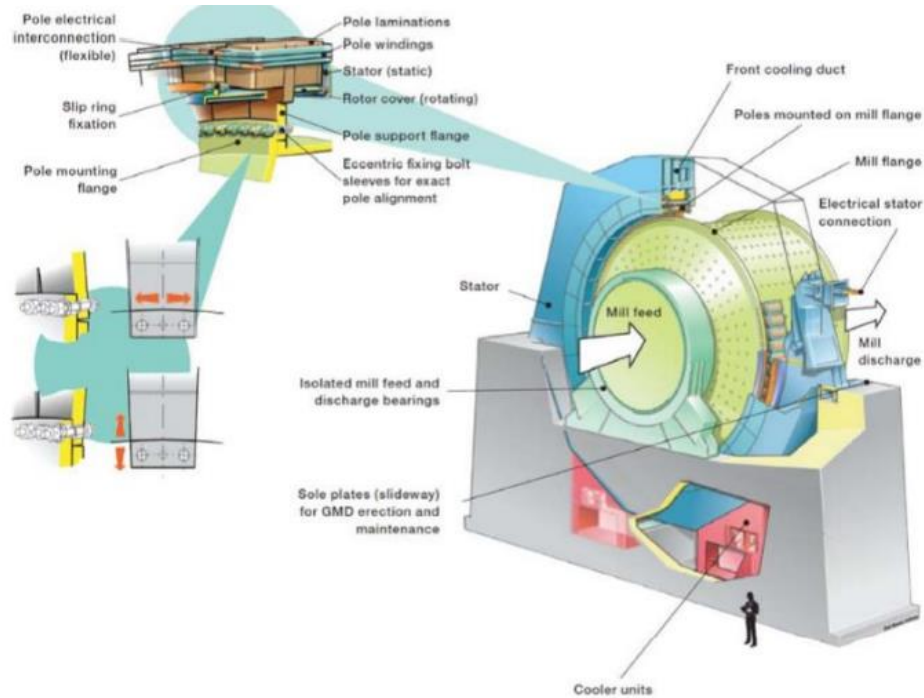


Nota: Tomado de:
https://library.e.abb.com/public/a935a0eb1ed95f6e8325779f002d3cc1/ABB_GMD_3BHS_490_275_spanish_LR.pdf

Figura 23

Configuración estructural de motor anillo de gran potencia que accionan molinos

Gearless

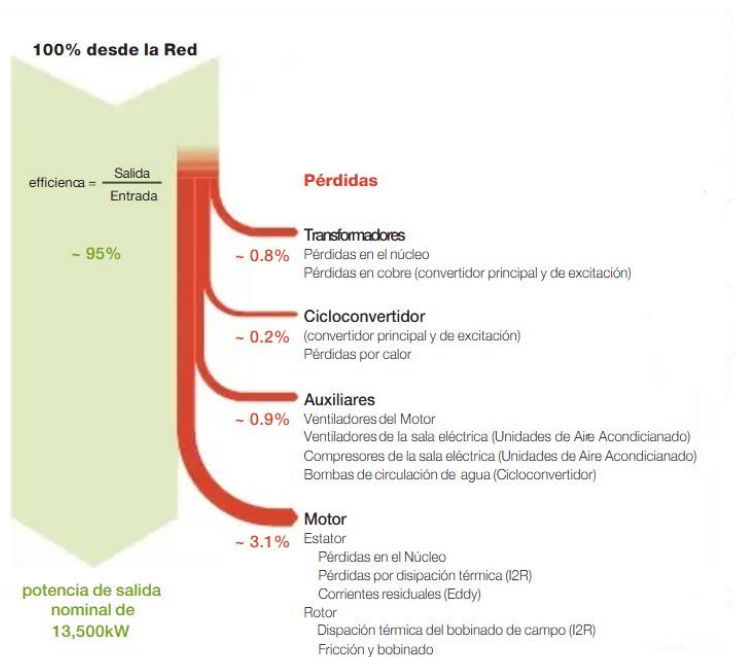


Nota: Tomado de:

https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UNSA_65d23011992d83e43a2037258f13795d

Figura 24

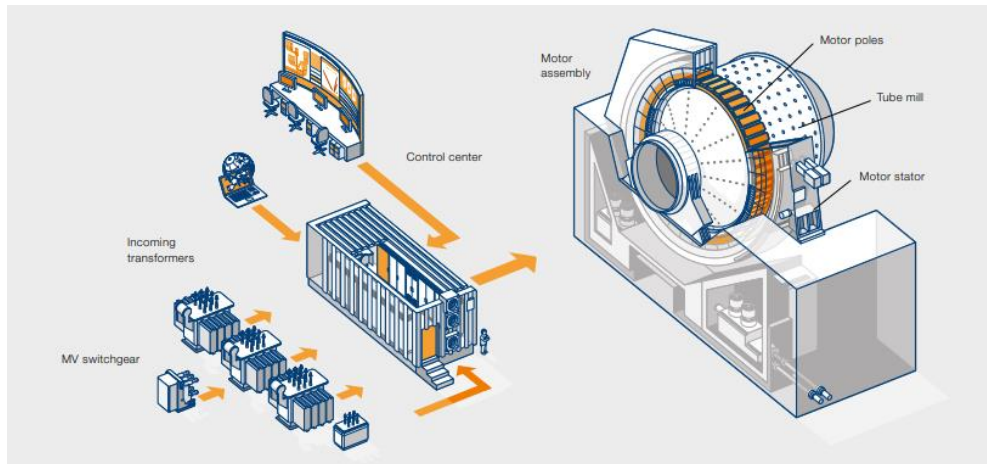
Pérdidas eléctricas en la eficiencia de un motor sin engranajes de un molino



Nota: Tomado de: <https://es.scribd.com/doc/210665398/GearLess-Driver-ABB>

Figura 25

Solución de accionamiento de molino sin engranajes



Nota: Tomado de:

https://library.e.abb.com/public/b9214b3c6a3658e548257dff0057cf57/Bigger_is_better_ABB%20drive%20systems%20designed%20to%20power%20mega%20mills%20in%20mining_3BHS%20814%20428%20ZAB%20E01.pdf

2.1.6 Bobinado de estator de motores síncronos de gran potencia

Materiales, sistemas y tipos de sistemas de aislamiento

A. Materiales de aislamiento

Resinas epoxi

Las resinas epoxi son polímeros termoestables que, al curarse, forman materiales rígidos y resistentes al calor. Su principal uso es en sistemas de aislamiento eléctrico debido a su elevada resistencia dieléctrica y propiedades mecánicas. Además, son duraderas frente a agentes químicos, lo que las hace ideales para entornos exigentes. En procesos como el VPI (Impregnación a Presión de Vacío), se utilizan para mejorar la integridad estructural de los devanados eléctricos. (Sancho, s.f.).

Mica

La mica es un mineral natural compuesto por silicatos que se caracteriza por dividirse en láminas delgadas y flexibles. Ofrece una excepcional resistencia al calor y a las descargas eléctricas, siendo clave en sistemas de aislamiento de alta tensión. Su uso

incluye formas como cintas y papeles impregnados con resinas, lo que permite crear aislantes térmicos y eléctricos con gran estabilidad y durabilidad. (Sancho, s.f.).

Fibra de vidrio

Este material inorgánico se utiliza como refuerzo en resinas sintéticas para fabricar laminados eléctricos, es resistente a la tracción y tiene alta rigidez dieléctrica, cualidades esenciales en aplicaciones donde se exigen propiedades mecánicas y térmicas. Aunque es vulnerable a la humedad, los tratamientos superficiales protegen sus fibras, garantizando un desempeño confiable en entornos industriales. (Sancho, s.f.).

Nomex

Nomex M™ combina mica calcinada y fibras de poliamida aromática en proporciones iguales, 50% y 50% ofreciendo una solución eficiente para el aislamiento eléctrico en motores y generadores de bajo y medio voltaje. Su gran resistencia mecánica permite prescindir de refuerzos adicionales, lo que lo convierte en una opción práctica y confiable. Sin embargo, su capacidad para soportar descargas parciales es algo limitada, por lo que se utiliza preferentemente en sistemas donde estas descargas son poco frecuentes o no representan un riesgo considerable. Este material ha sido una innovación clave en su campo, optimizando la durabilidad y funcionalidad de los equipos eléctricos. (Stone, 2004).

B. Sistemas de aislamiento

Sistemas termoestables de barras y bobinas individuales

En las máquinas de mayor capacidad, las bobinas y barras suelen estar fabricadas con materiales termoestables, que ofrecen una gran resistencia a temperaturas extremas y tienen una mayor estabilidad mecánica y eléctrica. Entonces las barras y bobinas individuales suelen ser preformadas y luego colocadas en las ranuras del estator, optimizando su ensamblaje y reduciendo el riesgo de daños mecánicos, por lo que estas configuraciones ayudan a minimizar las pérdidas de energía por efecto Joule, mejorando la eficiencia del sistema eléctrico. (Stone, 2004).

Tratamiento VPI o sistema global VPI

El tratamiento VPI o *Vacuum Pressure Impregnation* (Impregnación a Presión de Vacío), es un método avanzado para impregnar los sistemas de aislamiento con resinas termoendurecibles bajo condiciones controladas de vacío y presión. Este tratamiento permite que la resina penetre profundamente en las fibras y espacios del aislamiento, eliminando bolsas de aire y mejorando la densidad y resistencia del material. El sistema global VPI extiende este proceso a toda la estructura de aislamiento de la máquina, logrando una protección homogénea y mejorando significativamente la resistencia a descargas parciales y la vida útil del aislamiento. (Stone, 2004).

Figura 26

Procesos VPI



Nota: <https://slideplayer.es/slide/3923320/>

C. Tipos de sistemas de aislamiento

Los sistemas de aislamiento en un bobinado estático están compuestos por diversos elementos donde la función es prevenir posibles fallas eléctricas. Es así que los componentes trabajan de manera conjunta para garantizar la protección y el correcto desempeño del equipo, ofreciendo a la vez una resistencia adecuada frente a las exigencias eléctricas y mecánicas en las operaciones. El buen resultado de estos sistemas sirve para asegurar un funcionamiento seguro, estable y prolongado del dispositivo, minimizando riesgos y prolongando su vida útil. (Algar, 2015).

En ese sentido, los componentes básicos que permiten garantizar la calidad del aislamiento estático son:

Aislamiento de hilo (*strand insulation*)

Este tipo de aislamiento protege cada hilo conductor dentro de una bobina. Su función principal es evitar que la corriente eléctrica escape hacia otras partes del sistema, preservando así su eficiencia y seguridad. Este recubrimiento actúa como una barrera que minimiza el efecto piel, un fenómeno que impide que la corriente fluya de manera uniforme por toda la sección del conductor cuando es demasiado grueso. Además, su diseño garantiza una larga vida útil al prevenir cortocircuitos y degradación. En máquinas eléctricas, este tipo de aislamiento resulta esencial para asegurar un funcionamiento óptimo en condiciones exigentes. (Algar, 2015).

Aislamiento de espira (*turn insulation*)

El aislamiento de espira envuelve cada conjunto de espiras en las bobinas, separándolas unas de otras y del entorno. Esto resulta particularmente útil en sistemas donde las espiras están formadas por múltiples conductores, protegiéndolos contra fallos debido a diferencias de voltaje. Este aislamiento está fabricado con materiales laminados, como barnices y resinas, para proporcionar una alta rigidez dieléctrica. Su diseño asegura la estabilidad térmica y eléctrica, contribuyendo a la resistencia general de las máquinas frente a tensiones imprevistas que podrían comprometer su integridad. (Algar, 2015).

Aislamiento de tierra (*groundwall insulation*)

Este sistema separa las partes conductoras de la máquina, como el cobre de las bobinas, del núcleo metálico conectado a tierra. Su función es evitar que las corrientes eléctricas dañen los componentes o causen fallos de funcionamiento. El diseño de este aislamiento considera factores eléctricos, térmicos y mecánicos, buscando transmitir el calor generado hacia el núcleo disipador y prevenir vibraciones que puedan deteriorar

los materiales. Una falla en este aislamiento podría dejar la máquina inutilizable, por lo que su calidad es crucial para prolongar su vida útil. (Algar, 2015).

Cubierta semiconductor (*semiconductive coating*)

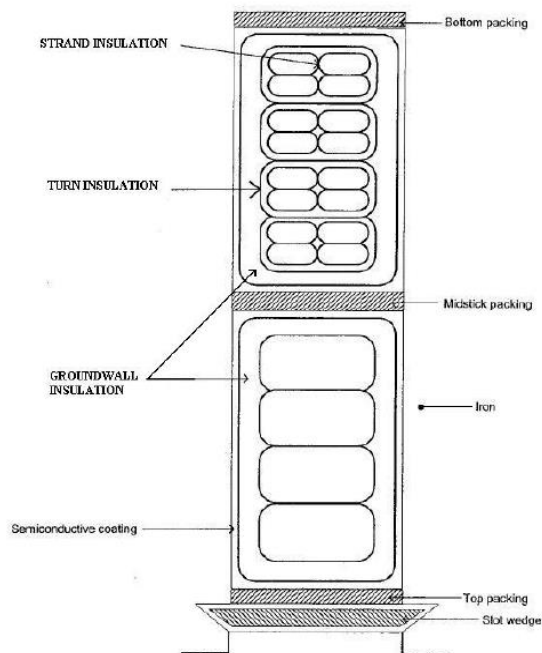
La cubierta semiconductor es importante ya que permite controlar y estabilizar los campos eléctricos que se generan en las superficies del aislamiento. Este material contribuye a distribuir de manera uniforme el campo eléctrico, evitando la aparición de puntos críticos que puedan derivar en pequeñas fallas o descargas. Es especialmente útil en equipos de alta tensión, donde cualquier irregularidad puede comprometer su funcionamiento. Al integrarse en los diseños actuales, refuerza la seguridad y prolonga la vida útil de los componentes, garantizando un rendimiento estable y confiable en entornos exigentes. (Algar, 2015).

Cuñas de apriete (*slot wedges*)

Las cuñas de apriete son piezas clave en los sistemas eléctricos rotativos, diseñadas para fijarse en las ranuras del estator y mantener las bobinas firmemente en su lugar, lo que evita desplazamientos que son ocasionados por las vibraciones durante el funcionamiento. A la vez protegen tanto la estructura mecánica como el rendimiento eléctrico, ya que cualquier movimiento podría comprometer el aislamiento de las bobinas e incluso derivar en fallos críticos como cortocircuitos. Son fabricadas con materiales que resisten al calor y al esfuerzo mecánico. (Algar, 2015).

Figura 27

Capas de un aislamiento



Nota: Tomado de: <https://e-archivo.uc3m.es/rest/api/core/bitstreams/9bc6f032-a1ae-411b-8d13-5f8727173a0b/content>

2.1.7 Teoría de la ruptura del aislamiento

La ruptura del aislamiento se da cuando el material aislante es débil y se desgasta ante la fuerza que ejerce el campo eléctrico, permitiendo que la corriente fluya a través de él. Esta situación es causada por varios motivos como la degradación térmica, química o electromecánica del material, así como por defectos internos como burbujas o impurezas. La ruptura puede ser de forma inmediata o gradual, lo que depende de las condiciones operativas y el diseño del aislamiento. (Algar, 2015).

Asimismo, el proceso de envejecimiento es complejo y depende de muchos factores. Los mecanismos de envejecimiento son los indicados en el apartado 2.1.3 causas de degradación (estrés eléctrico, mecánico, térmico y ambiental).

Descarga parcial

Según las normas IEC 60270 y IEEE, las descargas parciales (DP) hacen referencia a fenómenos eléctricos que se caracterizan a una chispa o descarga eléctrica que puentea

parcialmente el aislamiento de un conductor sin completarse hacia otro elemento conductor.

Asimismo, ocurre cuando una pequeña sección del aislamiento se degrada momentáneamente bajo estrés eléctrico, pero el resto del sistema aislante continúa funcionando adecuadamente. A diferencia de una falla completa del aislamiento, las descargas parciales no comprometen inmediatamente el sistema eléctrico, pero son un indicador de desgaste progresivo que puede culminar en una falla catastrófica si no se monitorea y controla adecuadamente.

La regla empírica sobre el tiempo que puede transcurrir entre la detección de descargas parciales y una posible falla completa del aislamiento varía según el nivel de voltaje de las máquinas:

- ✓ Más de 10 años para máquinas con niveles de 18 kV o superiores.
- ✓ 5 años para máquinas de 13.8 kV.
- ✓ 2 a 3 años para máquinas de 6 kV.
- ✓ Varios meses para máquinas de 4 kV.

Tipos de Descargas Parciales

1. Descargas Internas

Estas descargas ocurren en pequeñas cavidades o inclusiones dentro del material aislante, lo que es inevitable en la práctica debido a imperfecciones que se presentan durante la fabricación. Las cavidades llenas de aire tienen rigidez dieléctrica menor que el material circundante, lo que genera una alta intensidad de campo eléctrico dentro de ellas. Esto puede provocar fallas localizadas en condiciones normales de operación, comprometiendo gradualmente la integridad del aislamiento. (Castillo, 2018).

2. Descargas Superficiales

Estas descargas tienen lugar en superficies dieléctricas expuestas a un campo eléctrico paralelo, como en los extremos de los cables o salientes de bobinados. Una vez que se

inicia la descarga, esta se propaga más allá de la región inicial debido a cambios en el campo eléctrico. Factores como la composición del entorno (gas o líquido), las propiedades físicas del dieléctrico sólido (permitividad y resistencia superficial), la distribución del campo eléctrico y las condiciones de operación afectan su desarrollo. Las superficies contaminadas o impregnadas incrementan el riesgo de estas descargas. (Castillo, 2018).

3. Descargas por Efecto Corona

Son fenómenos eléctricos generados por la ionización del aire que rodea a un conductor debido a una alta concentración de carga en superficies pequeñas, como puntos o bordes afilados, bajo tensiones elevadas, este tipo de descargas suelen iniciarse más rápidamente con voltajes negativos que positivos y, en corriente alterna, son más comunes durante el medio ciclo negativo. Su inicio depende de factores como la suavidad de la superficie y también por las condiciones ambientales que influyen en la distribución de la carga cercana al conductor. (Castillo, 2018).

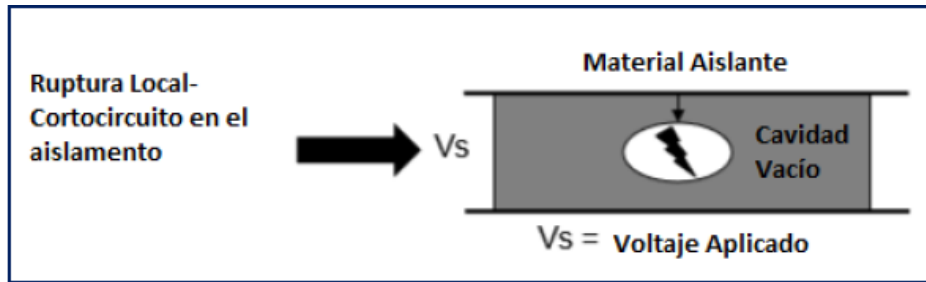
4. Descargas Parciales aplicados en los Devanados del Estator

El estator, pieza clave en motores eléctricos, está compuesto por conductores de cobre, un núcleo magnético laminado y un sistema de aislamiento. Los conductores transportan la corriente sin sobrecalentarse, mientras que el núcleo laminado reduce pérdidas magnéticas. (Castillo, 2018).

En ese sentido, el aislamiento eléctrico, aunque no genera energía ni campos magnéticos, es esencial para prevenir cortocircuitos entre conductores o hacia tierra. También disipa el calor en sistemas con enfriamiento indirecto y mantiene los conductores sujetos en las ranuras del estator, entonces como se expone normalmente a tensiones mecánicas, térmicas y eléctricas, el aislamiento es el componente más frágil del estator, determinando la vida útil y el rendimiento del motor. Su mantenimiento es crucial para garantizar una operación confiable. (Castillo, 2018).

Figura 28

Representación simple de Descarga Parcial

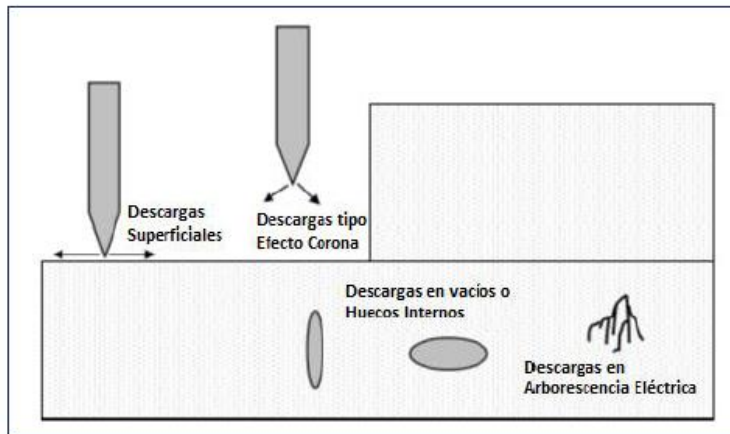


Nota: Tomado de:

https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UNSA_65d23011992d83e43a2037258f13795d

Figura 29

Tipos de Descargas Parciales

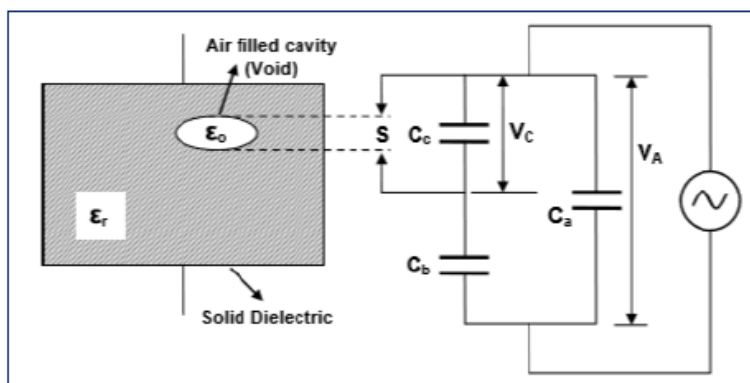


Nota: Tomado de:

https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UNSA_65d23011992d83e43a2037258f13795d

Figura 30

Modelo simple de una cavidad dieléctrica

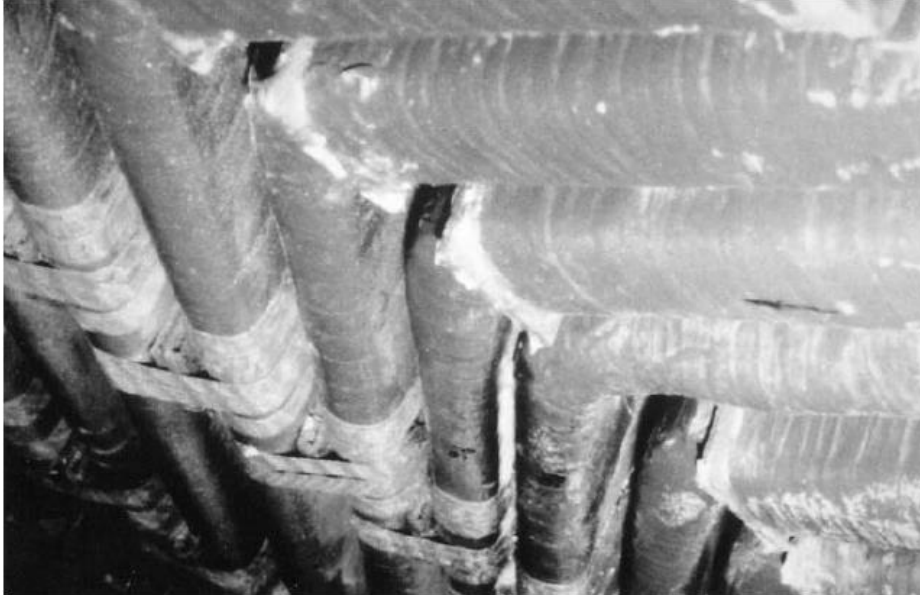


Nota: Tomado de:

https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UNSA_65d23011992d83e43a2037258f13795d

Figura 31

La descarga parcial (DP) entre bobinas adyacentes de diferentes fases resulta en un polvo blanco en las superficies de las bobinas



Nota: Tomado de: Stone, G. C., Boulter, E. A., Culbert, I., & Dhirani, H. (2004). Electrical insulation for rotating machines: Design, evaluation, aging, testing, and repair. IEEE Press. <https://doi.org/ISBN 0-471-44506-1>

2.1.8 Reparación de fallas de aislamiento

Las reparaciones de las fallas a tierra del aislamiento del bobinado del estator demandan recursos (personal, tiempo, materiales, equipos, herramientas, etc.), especialmente cuando se trata de motores de gran potencia y grandes dimensiones (hasta 20 m de diámetro), así por ejemplo será diferente reparar una falla ubicada próxima al nivel del piso o reparar otra falla ubicada a una altura de hasta 20 m aproximadamente desde el nivel del piso.

Es de vital importancia establecer un Plan de Contingencia, donde se establezcan las responsabilidades, recursos y procedimientos, para atender estas fallas, que compromete y ponen en riesgo la operación de la planta.

Asimismo, la reparación de fallas de aislamiento del bobinado del estator podría darse de la siguiente manera:

- ✓ Reparación de falla con reemplazo de bobina.
- ✓ Reparación de falla con seccionamiento y puenteo de bobina.

Por consiguiente, con este tipo de reparación de falla, con reemplazo de bobina o con seccionamiento y puenteo de bobina, no se garantiza que el motor eléctrico no vuelva a fallar, puesto que más bien será un indicador objetivo de que todas las bobinas de dicho sector (las más próximas a la conexión de línea o alimentación del estator) están igual de envejecidas y estresadas eléctricamente (mayor gradiente de potencial), por lo que es de esperar que otras bobinas de dicho sector también empiecen a fallar.

Reparación de falla con reemplazo de bobina

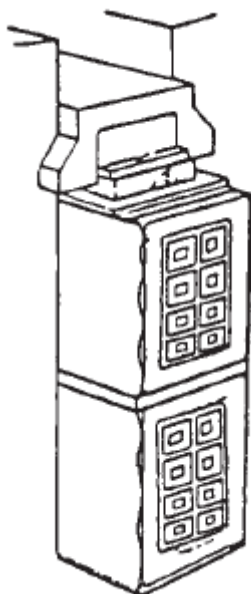
Cuando la reparación involucra reemplazar la bobina en falla, entonces hay que acceder al bobinado del estator y para ello hay que separar el estator del rotor (procedimiento con desplazamiento del estator).

Es importante definir la posición de la barra o bobina en falla, puesto que una bobina está compuesta por 2 barras o brazos laterales, una barra ubicada en la posición superior/exterior del perfil de la ranura (barra superior) y otra barra ubicada en la posición inferior/interior del perfil de la ranura (barra inferior).

Con esta reparación de falla con reemplazo de bobina, no se tiene alguna afectación a las vibraciones y eficiencia del motor eléctrico.

Figura 32

Cuello de ranura con barras superior e inferior de diferentes bobinas



Nota: Tomado de: Stone, G. C., Boulter, E. A., Culbert, I., & Dhirani, H. (2004). *Electrical insulation for rotating machines: Design, evaluation, aging, testing, and repair*. IEEE Press. <https://doi.org/ISBN 0-471-44506-1>

Reparación de fallas en barra superior

En el caso de ubicar la falla en una barra superior de su bobina correspondiente, es posible reemplazar únicamente dicha barra superior, siempre y cuando la configuración del bobinado ondulado así lo permita, caso contrario se tendrá que reemplazar la bobina completa (barras superior e inferior), para lo cual se seguirá el procedimiento de reparación de fallas en barra inferior, de la siguiente sección.

Figura 33

Proceso de reparación de fallas en barra superior



Estator desplazado



Andamiaje para acceder a bobinado



Retiro de cuñas de ranura



Extracción de barra superior en falla



Cuello de ranura de barra superior



Bobina en falla

Nota: Elaboración propia.

Reparación de fallas en barra inferior

Si la falla ocurriera en una barra inferior, es necesario desmontar o levantar un número de barras superiores igual al paso de la bobina completa (hasta 18 barras superiores en

nuestro caso), para que la bobina en falla pueda retirarse sin dificultad, es decir que su barra inferior (interior de la ranura) puede salir sin ser obstruida por las barras superiores (exterior de la ranura) de las 18 bobinas ubicadas por arriba de la bobina en falla, por la obstrucción que corresponde la exposición a las cabezas o extremos salientes de estas 18 bobinas o barras superiores.

Figura 34

Proceso de reparación de fallas en barra inferior



Desplazamiento del estator



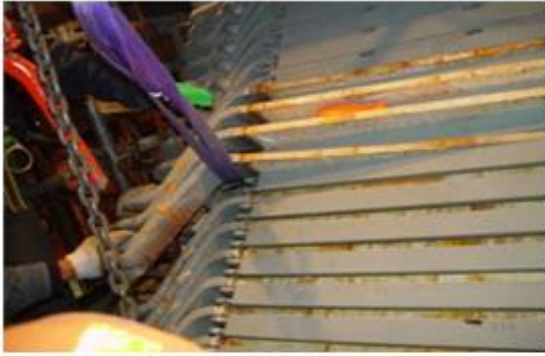
Retiro de cuñas de ranuras



Desoldado de uniones de cabezas de bobinas



Cabezas de bobinas con uniones desoldadas



Levantamiento de barras superiores



Levantamiento de barras superiores



Bobina nueva de reemplazo



Inserción de barras superiores restantes

Nota: Elaboración propia.

Reparación de falla con seccionamiento y puenteo de bobina

Cuando la reparación involucra seccionar y puentear la bobina en falla, entonces solo es necesario acceder a las cabezas de bobinas del bobinado del estator y no tener expuesto todo el bobinado y para ello no hay que separar el estator del rotor (procedimiento sin desplazamiento del estator).

Con esta reparación de falla con seccionamiento y puenteo de bobina, sí se tiene una leve afectación a las vibraciones y eficiencia del motor eléctrico, que podría volverse anormal después de un número máximo de puentes instalados por fase y/o diferencia de puentes instalados entre fases.

Figura 35

Proceso de reparación de falla con seccionamiento y puenteo de bobina



Desoldado de unión de cabeza de bobina



Corte de extremos de bobina en falla



Presentación de barra tipo puente



Presentación de barra tipo puente



Presentación final de barra tipo puente



Presentación final de 2 barras tipo puente

Nota: Elaboración propia.

2.2 Marco Conceptual: Definición de términos o conceptos.

✓ Aislamiento

El aislamiento eléctrico consiste en materiales como esmaltes, cintas de mica o resinas, que bloquean el paso indeseado de corriente entre componentes

conductores, protegiendo así al motor de posibles fallas eléctricas. La durabilidad de este aislamiento es esencial para el buen rendimiento de los motores eléctricos. (Castañeda, 2023).

✓ **Estrés eléctrico**

El estrés eléctrico en el contexto de máquinas eléctricas se refiere a las tensiones o demandas adicionales que representan un sobreesfuerzo en un sistema eléctrico, superando sus especificaciones de diseño y afectando negativamente el rendimiento y la vida útil del sistema (Chapman, 2012).

✓ **Modificación del Neutro del Estator**

La modificación del neutro del estator implica ajustes o cambios en la conexión a tierra de un sistema eléctrico. En el contexto de los motores eléctricos, esta modificación puede ser necesaria para mejorar la distribución de la corriente y reducir las tensiones no deseadas que pueden surgir debido a asimetrías en el sistema. (Mercado & Peña, 2016).

CAPÍTULO III

Desarrollo del Trabajo de Investigación

3.1 Contexto Operacional del trabajo de investigación

Como anteriormente se ha explicado, y a modo de antecedente, en el funcionamiento de la maquinaria eléctrica rotativa (motor eléctrico), su devanado o bobinado del estator está expuesto a procesos mecánicos, térmicos, eléctricos y ambientales, que van en detrimento de la vida útil, si se exceden unos límites aceptables, ya que, si no son controlados facilitarán la degradación del aislamiento eléctrico de la máquina y luego una falla eléctrica.

De igual importancia, las fallas eléctricas traerán como consecuencia paradas imprevistas de las máquinas, afectando todo el proceso en general, que podrían agravarse dependiendo de la industria a la que pertenecen, como en plantas de generación de energía eléctrica, plantas cementeras, plantas concentradoras de minerales, etc.

Por otro lado, el restablecimiento de la función u operación de la máquina conlleva una reparación correctiva, que podría ser de modo parcial, cuando se repara y/o reemplaza la o las bobinas comprometidas en la falla, o de modo total, cuando se reemplaza la totalidad de las bobinas del bobinado del estator. Esta reparación involucra el uso de recursos (personas, materiales, tiempo) y muchas veces pérdidas económicas considerables por lucro cesante.

Asimismo, dependiendo de la complejidad de la reparación eléctrica y de las pérdidas ocasionadas, muchas veces se opta por una reparación parcial para minimizar dichas pérdidas por lucro cesante, sin embargo con esta reparación parcial no se garantiza la disponibilidad continua del equipo, puesto que solo se reparó la bobina o parte del bobinado afectado, dejando con riesgo de falla al resto del bobinado, incluso de otras fases, ya que definitivamente el aislamiento de la parte del bobinado sin reparar, y que

volverá a ser energizada, también ha estado expuesto al mismo estrés eléctrico de la bobina que falló, por lo tanto tienen el mismo envejecimiento.

De este modo, la reparación definitiva de la falla podría darse con una reparación total, con el rebobinado del estator o reemplazo de la totalidad de las bobinas del bobinado del estator, y con el reemplazo del estator o reemplazo del mismo motor en su conjunto (estator y rotor), pero de cualquier modo esto representa una inversión económica significativa que no es inmediata, por los plazos de tiempo involucrados (aprobación y asignación de presupuesto, desarrollo de ingeniería, compra, fabricación y envío de componentes y/o equipamiento, ejecución y puesta en marcha), sin considerar las pérdidas por indisponibilidad del equipo para desarrollar esta reparación o reemplazo (lucro cesante).

Se propone entonces una solución optimizada, que involucra de todas maneras el reemplazar o reparar la bobina en falla, y adicionalmente realizar la inversión de la conexión estrella del bobinado del motor eléctrico trifásico, intercambiando las conexiones de línea y neutro, es decir que la alimentación eléctrica sea ahora por las 3 conexiones del neutro (X, Y, Z), en lugar de las 3 conexiones de la línea o alimentación (U, V, W), que pasarían a formar la nueva conexión de neutro.

A continuación, se presenta un resumen detallado de las fallas en los cuatro motores eléctricos síncronos con bobinado ondulado, destacando los patrones identificados y sus principales implicancias en el desempeño operativo de la empresa.

Tabla 3*Resumen de Fallas a Tierra en Motores*

Motor	Potencia (HP)	Cantidad de Fallas	Tiempo de reparación (h)	Tiempo de reparación (días)	Métodos de Reparación
Motor síncrono Nro. 1	27,000	9	751.4	31.3	Reemplazo de barra, Puente, Cambio de Estator.
Motor síncrono Nro. 2	15,000	10	1356.98	56.5	Reemplazo de semi bobina, Puente, Cambio de Estator.
Motor síncrono Nro. 3	15,000	6	550.85	22.9	Reemplazo de semi bobina, Puente, Cambio de punto neutro, Cambio de estator.
Motor síncrono Nro. 4	15,000	9	383.67	16.0	Reemplazo de semi bobina, Puente, Cambio de punto neutro.

Nota: Elaboración propia.

3.2 Estudio de caso de fallas de bobinados de estator

En el presente estudio se presentará una falla a tierra en particular del aislamiento del bobinado del estator de un motor síncrono de polos salientes y de gran potencia. Esta falla es una entre muchas fallas que tuvieron similar mecanismo de falla (causa raíz) y consecuencias.

Tabla 4*Datos de placa del motor a tratar*

Características	Especificación
Tag	310-MLB-001
Marca	ABB ALSTOM POWER
Tipo	WAZ: 1000/108/56
Nº de serie	101670
Voltaje	3130 ± 5% Vac Excitación: 383 Vdc
Corriente	2194 A/Excitación: 425 A
Cos Φ	0.97
Potencia	11 190 kW (15 000 HP)
Velocidad	Promedio/máxima 11.38/14.3 RPM
Conexión	Estrella
Tipo de Aislamiento	F (POLYSEAL)
Frecuencia	0 - 5.311 Hz
Año de fabricación	1999
Nº de fases	3
Nro. de bobinas (estator)	480 (160/fase)
Nro. de polos (rotor)	56

Nota: Elaboración propia.

3.2.1 Causas de falla

Las fallas ocurrieron en la zona de mayor tensión eléctrica, donde la bobina sale del núcleo del estator (cuello de ranura). La causa última de las fallas fue el deterioro del aislamiento debido a la alta actividad de descarga parcial hasta que ya no pudo soportar el voltaje de operación y falló en el punto más débil.

Varios factores contribuyeron a la falla:

- ✓ Erosión de descarga parcial en el aislamiento en la salida de la ranura donde el estrés eléctrico es más alto.
- ✓ Un gran vacío provocó una descarga parcial interna en el área de la falla.
- ✓ Las delaminaciones entre las capas del encintado de Nomex provocaron una descarga parcial interna en el área de la falla.
- ✓ Los niveles de descarga parcial aumentaron por la operación a elevada altura (baja presión y densidad del aire del ambiente).

Cuando la erosión de descarga parcial avanza hacia el área donde están las delaminaciones o huecos (vacíos) puede unirse a los ataques de descarga parcial desde la superficie de aislamiento en el área erosionada y encontrar el camino más fácil a través del área erosionada para perforar el aislamiento.

Figura 36

Ubicación de falla



Nota: Elaboración propia.

Figura 37

Erosión en la superficie de la bobina



Nota: Elaboración propia.

Figura 38

Ubicación de la muestra tomada de la bobina para un examen más detallado



Nota: Elaboración propia.

Figura 39

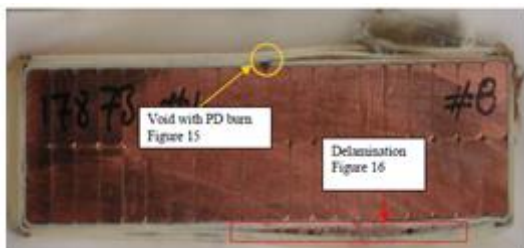
Corte N° 4 de la sección transversal de la bobina



Nota: Elaboración propia.

Figura 40

Corte N° 8 de la sección transversal de la bobina



Nota: Elaboración propia.

3.2.2 Registro de fallas de bobinado

En esta sección se muestran los registros de 34 fallas a tierra del aislamiento de estator en total de 4 motores síncronos de gran potencia, llamados GMD (Gearless Mill Drive), acontecidas entre los años 2004 a 2019. Estos motores síncronos iniciaron su operación en 2001.

Registro de fallas de motor síncrono N° 1 (27,000 HP)

Este motor eléctrico empezó a operar en junio 2001. Se presentaron 9 fallas a tierra en total desde octubre 2007 hasta abril 2009 (un año y medio aproximadamente), en que se realizó la inversión de la conexión estrella del bobinado del estator, no volviendo a fallar en 4 años y medio aproximadamente hasta setiembre 2013, en que se reemplazó completamente el estator con un bobinado fabricado con sistema de aislamiento VPI.

Tabla 5

Registro de fallas en motor síncrono N° 1

N° Falla	Inicio	Fin	MTBF (días)	Tiempo (h)	Fase	Bobina	Ranura	Posición Barra	Método Reparación
0	01/06/2001								Inicio de operación
1	30/10/2007	09/11/2007	2342	244.5	U	22	189	Inferior	Reemplazo de barra
2	04/12/2007	08/12/2007	25	98.5	W	11	336	Superior	Reemplazo de barra
3	01/01/2008	05/01/2008	24	91.3	U	19	226	Superior	Reemplazo de barra
4	14/01/2008	20/01/2008	9	142.1	U / W	34 / 57	1 / 193	Superior/ Inferior	Reemplazo de barras
5	07/11/2008	10/11/2008	292	63.4	W	28/29	74 y 81		Puente
6	24/11/2008	25/11/2008	14	37.1	W	31/32	29 y 36		Puente
7	11/12/2008	12/12/2008	16	25.3	V	26/27	109 y 116		Puente
8	31/01/2009	01/02/2009	50	25.1	U	11/12	339 y 346		Puente
9	09/03/2009	10/03/2009	36	24.1	U	20/21	204 y 211		Puente
10	03/09/2013	04/10/2013	1638						Se realizó el reemplazo del estator.
		Total	751.40	Horas					

Nota: Elaboración propia. (2007-2009).

Las 9 fallas a tierra del aislamiento del bobinado del estator se han presentado en las tres fases (U, V, W), específicamente desde la bobina N° 11 hasta la bobina N° 57, de un total de 180 bobinas por fase (540 bobinas en total en las tres fases), lo que indica que estas fallas ocurrieron en el primer 32% de la totalidad de bobinas del estator, tal como se muestra en la Tabla 5.

Registro de fallas de motor síncrono N° 2 (15,000 HP)

Este motor eléctrico empezó a operar en junio 2001. Se presentaron 5 fallas a tierra desde setiembre 2004 hasta junio 2009 (5 años aproximadamente), en que se realizó la inversión de la conexión estrella del bobinado del estator, no volviendo a fallar en 6 años y medio aproximadamente, momento en que volvieron a presentar otras 5 fallas a tierra desde enero 2016 hasta junio 2019 (3 años y medio aproximadamente), en que se reemplazó completamente el estator con un bobinado fabricado con proceso de VPI.

Tabla 6

Registro de fallas en motor síncrono N° 2

N° Falla	Inicio	Fin	MTBF (días)	Tiempo (h)	Fase	Bobina	Ranura	Posición Barra	Modo Reparación
0	01/06/2001								Inicio de operación
1	24/09/2004	16/10/2004	1211	526.3	U	3	82	Superior	Reemplazo de semibobina
2	14/11/2005	24/11/2005	394	228.7	U	8	176	Inferior	Reemplazo de semibobina
3	15/01/2007	19/01/2007	417	96.6	V	10	83	Superior	Reemplazo de semibobina
4	19/06/2008	25/06/2008	517	142.2	V	6	378	Inferior	Reemplazo de semibobina
5	02/06/2009	03/06/2009	342	32.2	V	19	182 y 191		Puente
6	28/01/2016	29/01/2016	2430	26.8	U	12	124 y133		Puente
7	26/04/2017	27/04/2017	453	30.0	V				Puente
*	11/07/2017	18/07/2017	75	168.0	V, U, V				Reemplazo de 03 semibobina, se retira los puentes.
8	23/02/2018	23/02/2018	220	17.3	U	7	141 y 150	Superior	Puente
9	31/01/2019	03/02/2019	342	69.2	U, V, U, U, J	15, 8, 39 y 94	271, 271/270, 179	Superior, inferior, superior, superior	Puente
10	28/06/2019	28/06/2019	145	20.7	V	7	50 y 59		Puentes
11	04/11/2019	29/11/2019							Se realizó el reemplazo del estator.
			Total	1,356.98	Horas				

Nota: Elaboración propia. (2004-2019).

En la Tabla 6, las 10 fallas a tierra del aislamiento del bobinado del estator en total se han presentado en las 3 fases (U, V, W), desde la bobina N° 2 hasta la bobina N° 39, de un total de 160 bobinas por fase (480 bobinas en total en las 3 fases), es decir que estas fallas se han presentado en el primer 24% de la totalidad de bobinas.

Registro de fallas de motor síncrono N° 3 (15,000 HP)

Este motor eléctrico empezó a operar en junio 2001. Se presentaron 4 fallas a tierra desde noviembre 2006 hasta junio 2009 (2 años y medio aproximadamente), en que se realizó la inversión de la conexión estrella del bobinado del estator, no volviendo a fallar en 6 años y medio aproximadamente, donde se volvieron a presentar otras 2 fallas a tierra desde enero 2016 hasta marzo 2017 (un año aproximadamente), hasta que en enero 2019 se realizó una nueva modificación en la conexión estrella del bobinado del estator.

Tabla 7*Registro de fallas en motor síncrono N° 3*

N° Falla	Inicio	Fin	MTBF (días)	Tiempo (h)	Fase	Bobina	Ranura	Posición Barra	Modo Reparación
0	01/06/2001								Inicio de operación
1	12/11/2006	20/11/2006	1990	187.1	W	4	85	Inferior	Reemplazo de semibobina
2	30/12/2007	08/01/2008	405	226.6	W	4	85	Inferior	Reemplazo de semibobina
3	28/02/2009	02/03/2009	417	36.1	U	5	116 y 125		Puente
4	20/05/2009	22/05/2009	79	32.3	V	6	403 y 412		Puente
5	11/01/2016	13/01/2016	2425	39.3	W				Puente
6	08/03/2017	09/03/2017	420	29.3	W				Puente
7	23/01/2019	03/02/2019	685	276.0	V, U, W (2)				Reemplazo de 04 semibobina, se retira los puentes. Se realizó la modificación del neutro.
8	01/06/2022	02/07/2022	1214						Se realizó el reemplazo del estator.
			Total	550.85	Horas				

Nota: Elaboración propia. (2006-2017).

En la Tabla 7, como se muestra las 6 fallas a tierra del aislamiento del bobinado del estator en total se han presentado en las 3 fases (U, V, W), desde la bobina N° 4 hasta la bobina N° 6, de un total de 160 bobinas por fase (480 bobinas en total en las 3 fases), es decir que estas fallas se han presentado en el primer 4% de la totalidad de bobinas.

Registro de fallas de motor síncrono N° 4 (15,000 HP)

Este motor eléctrico empezó a operar en junio 2001. Se presentaron 3 fallas a tierra desde marzo 2006 hasta junio 2008 (2 años aproximadamente), en que se realizó la inversión de la conexión estrella del bobinado del estator, no volviendo a fallar en 9 años aproximadamente, donde se volvieron a presentar otras 6 fallas a tierra desde marzo 2017 hasta octubre 2019 (2 años y medio aproximadamente), en que se realizó una nueva modificación en la conexión estrella del bobinado del estator.

Tabla 8*Registro de fallas en motor síncrono N° 4*

N° Falla	Inicio	Fin	MTBF (días)	Tiempo (h)	Fase	Bobina	Ranura	Posición Barra	Modo Reparación
0	01/06/2001								Inicio de operación
1	09/03/2006	13/03/2006	1742	93.7	U	6	133	Superior	Reemplazo de semibobina
2	24/05/2008	28/05/2008	803	100.9	U	4	108	Inferior	Reemplazo de semibobina
3	18/06/2008	22/06/2008	21	97.5	U	3	91	Inferior	Reemplazo de semibobina
4	15/03/2017	16/03/2017	3188	27.3	V	139 (22)	148 y 139		Puente
5	13/01/2018	14/01/2018	303	27.0	W	154 (7)	135 y 144		Puente
6	23/07/2019	24/07/2019	555	17.8	W	157 (4)	84 y 93		Puente
7	02/09/2019	02/09/2019	40	19.3	W	155 (6)	118 y 127	inferior	Puente
8	26/09/2019	27/09/2019	24	16.9	V	138 (23)	123 y 131	inferior	Puente
9	06/10/2019	15/10/2019	9	218.8	V (2), W (4)			02 superior; 04 Inferior	Reemplazo de 06 semibobina, se retira los puentes. Se realizó la modificación del neutro.
10	15/10/2019	15/04/2025	2120						Fecha actual
			Total	383.67	Horas				

Nota: Elaboración propia. (2006-2019).

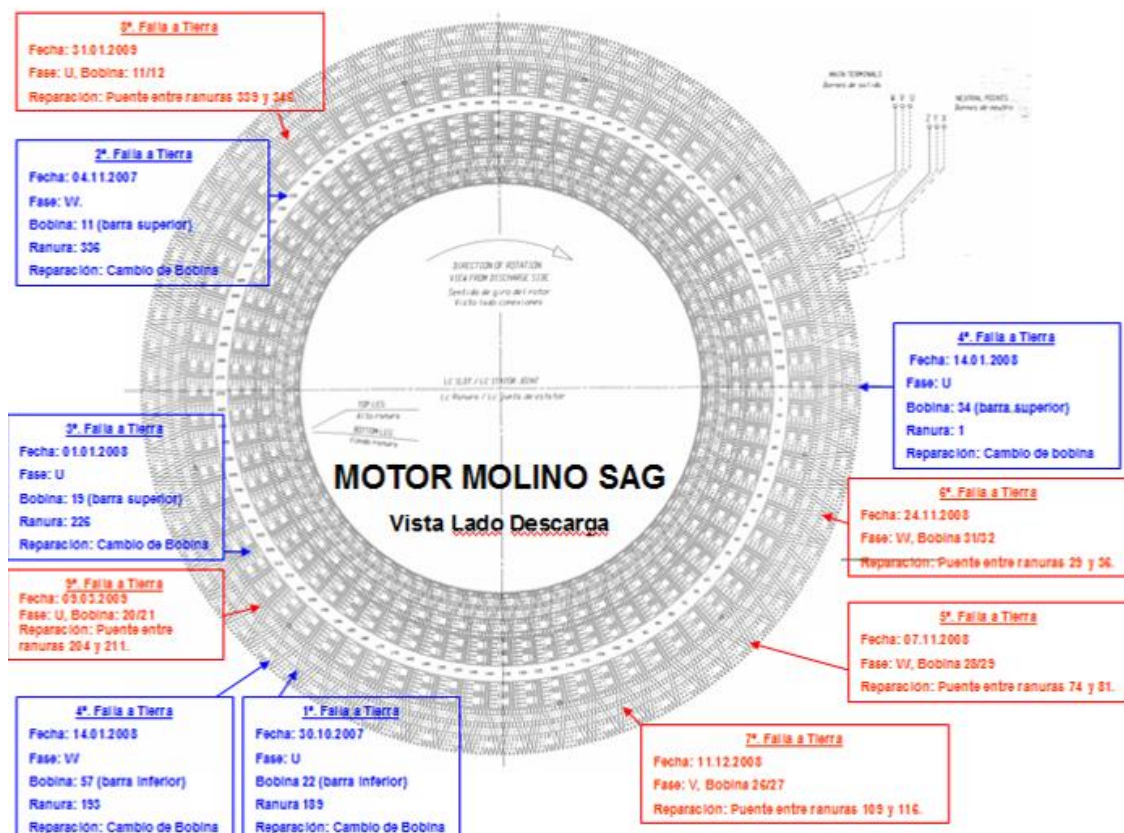
Tal como se detalla en la Tabla 8, se identificaron 9 fallas a tierra en el aislamiento del bobinado del estator, distribuidas a lo largo de las tres fases (U, V y W). Estas fallas se localizaron entre las bobinas N° 3 y N° 23. Considerando que el sistema cuenta con 160 bobinas por fase, lo que suma un total de 480 bobinas, se concluye que los eventos se concentraron en las 23 primeras bobinas de cada fase (primer 14% del bobinado). Esta distribución sugiere una vulnerabilidad en las primeras bobinas del estator, por mayor estrés eléctrico (el gradiente de potencial en todo el recorrido del bobinado va disminuyendo desde la conexión de línea hasta la conexión de neutro).

3.2.3 Ubicación de fallas

Ubicación de fallas de motor síncrono N° 1 (27,000 HP)

Figura 41

Ubicación de fallas de motor síncrono N° 1 (27,000 HP)



Nota: Elaboración propia.

En la Figura 41 se muestra la ubicación de las 9 fallas a tierra del aislamiento del bobinado del estator del motor síncrono N° 1.

3.3 Metodología de inversión y modificación del neutro del estator

Como anteriormente se ha mostrado, la solución definitiva a las continuas fallas del aislamiento de las bobinas del estator podría darse con el rebobinado del estator o con el reemplazo del estator en su conjunto, siendo estas soluciones a largo plazo, representando una inversión económica significativa que no es inmediata (puede tomar algunos años), por los plazos de tiempo involucrados (aprobación y asignación de presupuesto, desarrollo de ingeniería, compra, fabricación y envío de componentes y/o equipamiento, ejecución y puesta en marcha), sin considerar las pérdidas por indisponibilidad del equipo para desarrollar esta reparación o reemplazo (30 días o más aproximadamente). Por lo tanto, se hace necesaria alguna otra mejor solución técnica y económicamente viable, en el corto plazo.

Como soluciones inmediatas y beneficiosas para aumentar la vida útil del aislamiento del bobinado del estator, se ha desarrollado la metodología que consiste en tres protocolos de solución para abordar la problemática identificada.

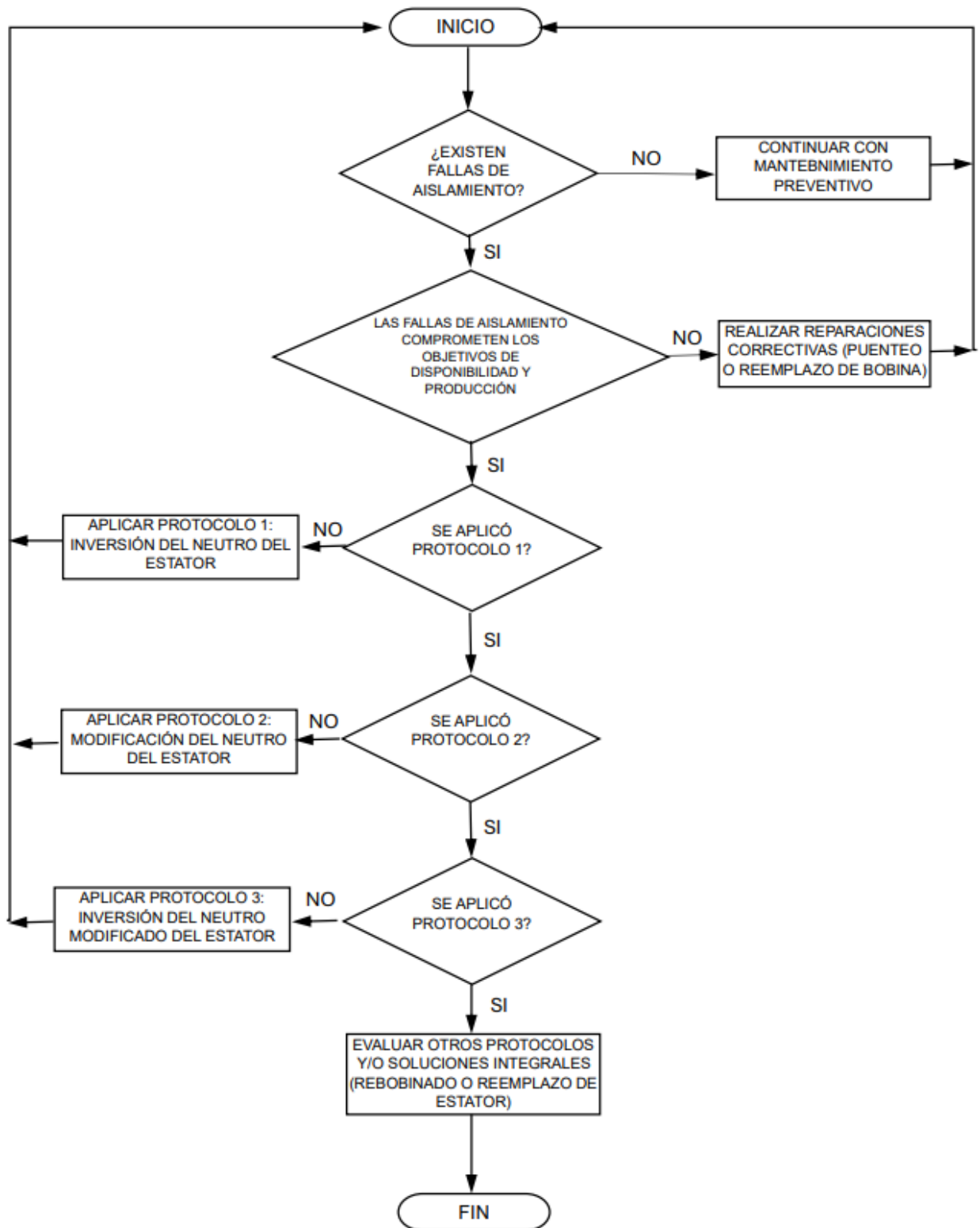
- ✓ Inversión del neutro.
- ✓ Modificación del neutro.
- ✓ Inversión del neutro modificado.

El tercer protocolo (inversión del neutro modificado) es una recomendación, que resulta de una analogía del primer protocolo (inversión del neutro), a detallarse más adelante.

A continuación, se presenta un flujograma que describe de manera clara y ordenada esta metodología, con el proceso de decisión para aplicar estos protocolos, priorizando siempre la estabilidad operativa y el cuidado del equipo:

Figura 42

Flujograma para la aplicación de protocolos de neutro del estator



Nota: Elaboración propia.

3.3.1 Protocolo 1: Inversión del neutro del bobinado del estator

Como anteriormente se ha mostrado, las fallas del aislamiento del bobinado del estator se han presentado en las primeras bobinas de todo el bobinado del estator, es decir en aquellas bobinas más próximas a la conexión de línea o de alimentación (U, V, W), puesto que son las bobinas energizadas con el voltaje de alimentación, soportando el mayor estrés eléctrico y por ende son las bobinas con mayor envejecimiento, en comparación con las bobinas más próximas a la conexión del neutro (X, Y, Z), que está flotando como en nuestro caso.

Se propone entonces una solución optimizada, que involucra de igual forma reemplazar o reparar la bobina en falla, al momento de su ocurrencia, y adicionalmente aprovechar en realizar la inversión de la conexión estrella del bobinado del estator (previamente analizada y preparada), es decir que la alimentación de las 3 conexiones de la línea o alimentación (U, V, W) sea ahora por las 3 conexiones del neutro (X, Y, Z), y viceversa, de tal forma que las bobinas menos envejecidas o con menor estrés eléctrico estén energizadas ahora con el voltaje de alimentación, con la intención de tener una expectativa de vida, sin fallas a tierra del aislamiento, similar a la edad a la que tenían los motores eléctricos hasta el inicio del proceso de fallas a tierra del aislamiento, según la siguiente tabla:

Tabla 9

Registro de años sin fallas en motores eléctricos

Motor	Potencia (HP)	Años sin fallas
Motor síncrono N° 1	27,000	6
Motor síncrono N° 2	15,000	3
Motor síncrono N° 3	15,000	5
Motor síncrono N° 4	15,000	5

Nota: Elaboración propia

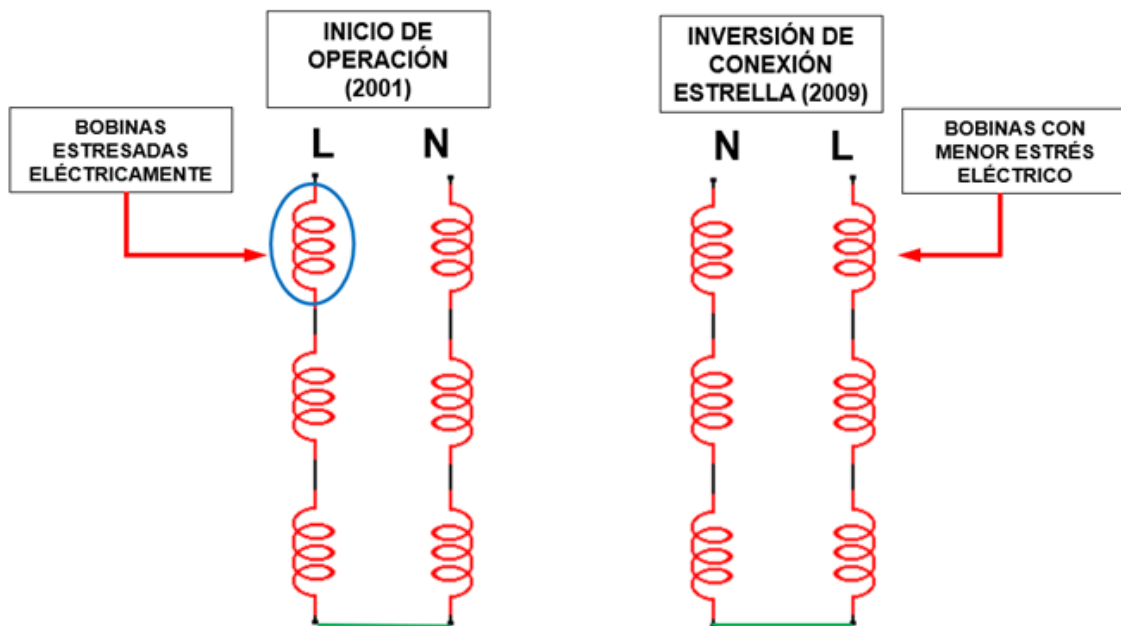
Para esta inversión de la conexión estrella del bobinado del estator se debe intervenir en la caja de conexiones del motor eléctrico o seccionador tipo cuchilla (*knife switch*), a

la entrada del motor eléctrico, donde se tienen disponibles las 3 conexiones de la línea o alimentación (U, V, W) y las 3 conexiones del neutro (X, Y, Z), y teniendo en cuenta que para motores eléctricos de gran potencia estas conexiones son en realidad barras de cobre, estas modificaciones también deben contemplar el uso de barras de cobre electrolítico, según las especificaciones técnicas del Cobre C11000.

Esta implementación de la inversión del neutro del estator puede tomar entre 8 a 24 horas, dependiendo de la complejidad de las conexiones, con previa planificación, teniendo los recursos preparados y disponibles (personal, materiales, consumibles, equipos, herramientas, etc.), siendo posible hacerlo insitu y no necesariamente en un taller externo.

Figura 43

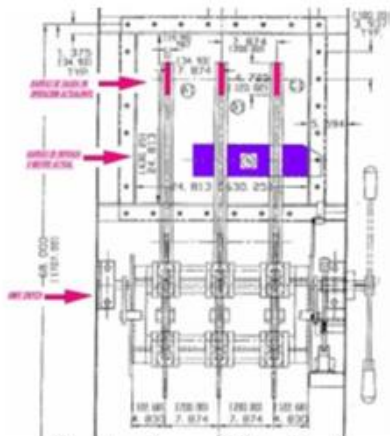
Diagrama esquemático de inversión de la conexión estrella del bobinado del estator



Nota: Elaboración propia.

Figura 44

Proceso de Inversión del Neutro del estator



Seccionador cuchilla original



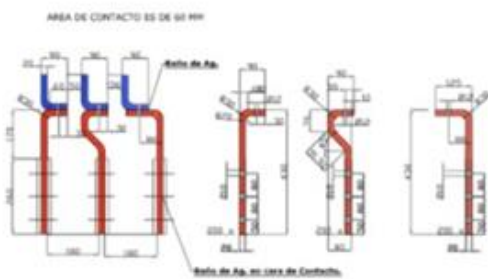
Seccionador cuchilla original



Conexiones del neutro original



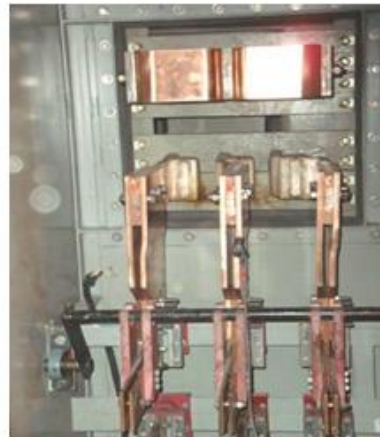
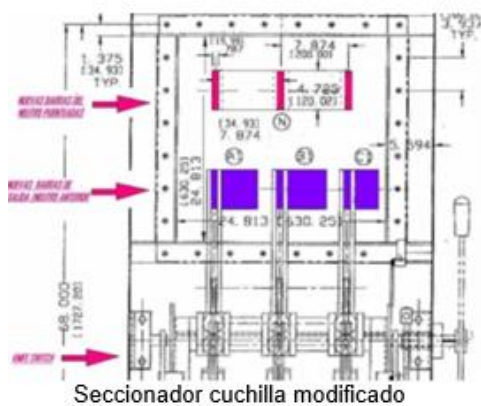
Conexiones de línea original



Planos de conexiones de cobre modificadas



Barras de cobre nuevas



Nota: Elaboración propia.

Esta inversión de la conexión estrella del bobinado del estator fue implementada en las instalaciones de la misma planta industrial en las siguientes fechas:

Tabla 10

Registro de fechas de implementación de inversión del neutro

Motor	Potencia (HP)	Fechas de inicio de operación del motor	Fechas de primera falla del aislamiento del motor	Fechas de implementación de inversión del neutro
Motor síncrono N° 1	27,000	Junio 2001	Octubre 2007	Abril 2009
Motor síncrono N° 2	15,000	Junio 2001	Setiembre 2004	Junio 2009
Motor síncrono N° 3	15,000	Junio 2001	Noviembre 2006	Junio 2009
Motor síncrono N° 4	15,000	Junio 2001	Marzo 2006	Febrero 2009

Nota: Elaboración propia

Luego de esta primera implementación de la inversión de la conexión estrella del bobinado del estator, se tuvo una ampliación de la vida útil del aislamiento del bobinado del estator, sin fallas a tierra, mucho más de la esperada, como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 11*Vida útil alcanzada sin intervención*

Motor	Potencia (HP)	Vida útil alcanzada sin intervención
Motor síncrono N° 1	27,000	4.5 años ⁽¹⁾
Motor síncrono N° 2	15,000	6.5 años
Motor síncrono N° 3	15,000	6.5 años
Motor síncrono N° 4	15,000	9 años

Nota: Elaboración propia

⁽¹⁾ No se observa incremento en la vida útil después de la inversión del neutro por haberse reemplazado el estator en setiembre de 2013.

En el caso del motor síncrono N° 1 (27,000 HP), solo se tuvo un incremento de la vida útil del aislamiento del bobinado del estator, sin fallas a tierra, de 4.5 años, puesto que en setiembre 2013 se realizó la solución integral de reemplazo del estator, con un bobinado fabricado con sistema de aislamiento VPI.

En el caso de los motores síncronos 2, 3 y 4 (15,000 HP cada uno), se tuvo un incremento considerable de la vida útil del aislamiento del bobinado del estator, sin fallas a tierra, más de lo esperado, puesto que se implementaron otras estrategias operativas que ayudaron a este propósito, por ejemplo:

- ✓ Control de límites de voltaje de operación de los motores eléctricos.
- ✓ Inclusión de la limpieza manual del bobinado del estator, inspección de espárragos del núcleo magnético, inspección de láminas del núcleo magnético, pruebas eléctricas AC/DC y medición de Descargas Parciales (DP), en el Plan de Mantenimiento de estos motores eléctricos.
- ✓ Instalación de equipo de Descargas Parciales en línea en los motores eléctricos.

Con esta implementación de la inversión del neutro del estator, no se tiene alguna afectación a las vibraciones y eficiencia del motor eléctrico, puesto que se mantiene la configuración del bobinado del estator.

3.3.2 Protocolo 2: Modificación del neutro del bobinado del estator

Luego de la implementación anterior, de inversión de la conexión estrella del bobinado del estator, y con la finalidad de seguir aumentando la vida útil del motor eléctrico, se debe esperar a que se inicie nuevamente el proceso de fallas a tierra del aislamiento del bobinado del estator, entonces se tendrá que las bobinas más próximas a la nueva conexión de línea o de alimentación (U' , V' , W' , antes X , Y , Z) estarán igual de envejecidas y estresadas eléctricamente que las bobinas más próximas a la nueva conexión del neutro (X' , Y' , Z' , antes U , V , W), por lo tanto es posible implementar una nueva solución referida a la modificación del neutro del bobinado del estator, es decir hacer que la nueva conexión de la alimentación de las 3 fases (U , V , W) y la nueva conexión del neutro de la estrella (X , Y , Z), estén en la parte media u otra del bobinado del estator, previo corte del mismo, y que la conexión original de la alimentación y neutro de la estrella se unan o cortocircuitan para enseriar el bobinado del estator, formando así una nueva conexión estrella del estator.

Al tener ya ambos extremos del bobinado del estator con sus bobinas igual de envejecidas y estresadas eléctricamente, surge la opción de alimentar el estator por la parte media u otra del bobinado, dependiendo de la configuración del mismo, puesto que este tramo o rango de bobinas ha sido estresado eléctricamente con un nivel de voltaje menor al voltaje de línea (50% en el caso de la parte media del bobinado), y por lo tanto se puede seguir aumentando la vida útil del aislamiento del bobinado del estator.

Asimismo, cabe precisar que las descargas parciales, que estresan eléctricamente el bobinado, aparecen en aquellas bobinas sometidas o muy próximas al voltaje de alimentación (voltaje nominal), mientras que estas descargas parciales no aparecen en aquellas bobinas de la parte media del bobinado, al estar sometidas al 50% del voltaje nominal aproximadamente, por lo que estas bobinas intermedias no están estresadas eléctricamente, así que su envejecimiento por estrés eléctrico es nulo, por lo tanto su

expectativa de vida es la misma que cuando estuvieron nuevas, excepto por las otras causas de envejecimiento (estrés térmico, estrés mecánico, entorno ambiental, etc.).

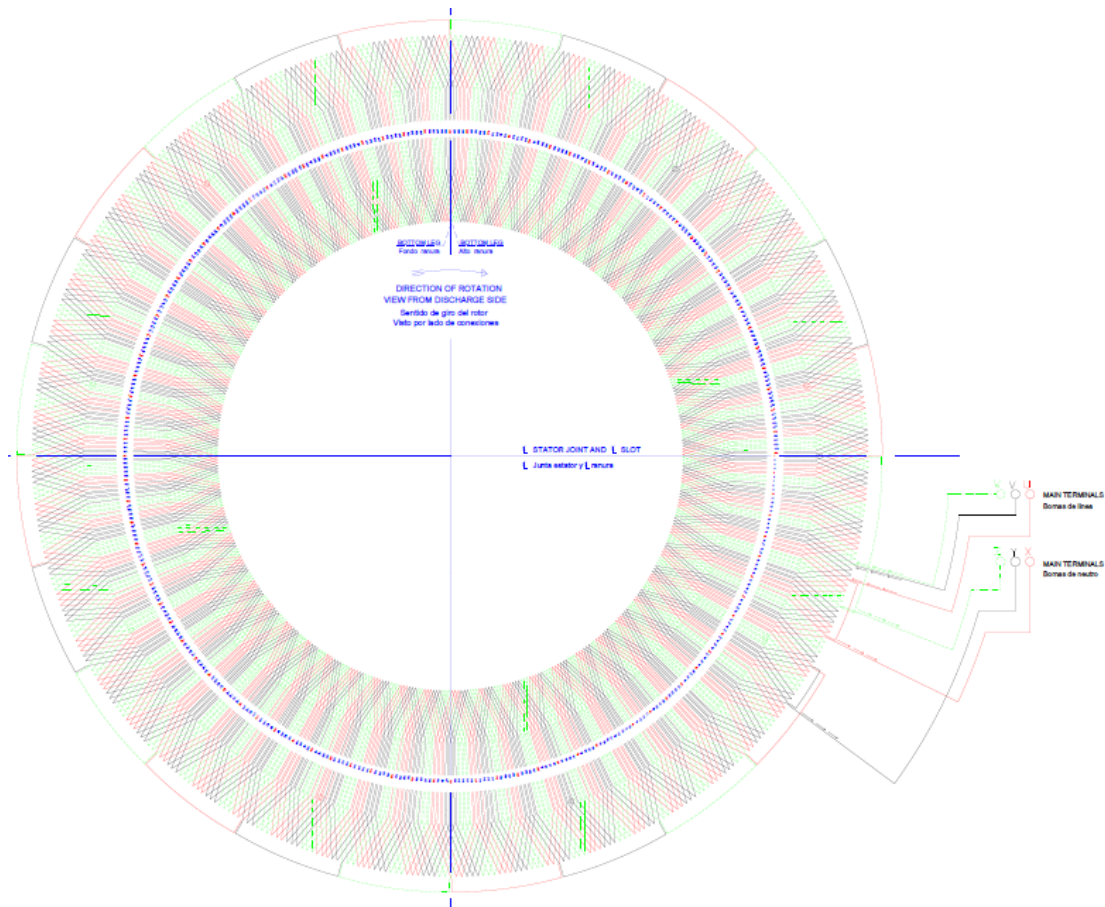
Sin embargo, para realizar esta modificación del neutro del bobinado del estator, que consiste en tener las nuevas conexiones de línea o de alimentación (U, V, W) y las nuevas conexiones de neutro (X, Y, Z) en la parte media u otra del bobinado del estator, se debe acceder al interior del motor eléctrico propiamente, es decir tener acceso directo al bobinado del estator, caso contrario se tendría que realizar estas modificaciones en un taller debidamente acondicionado para este propósito.

Esta implementación de la modificación del neutro del bobinado del estator puede tomar entre 4 a 8 días, dependiendo de la complejidad de las conexiones, dimensiones del motor eléctrico, con previa planificación, teniendo los recursos preparados y disponibles (personal, materiales, consumibles, equipos, herramientas, etc.), y es posible hacerlo en la misma instalación o en un taller externo.

Los motores eléctricos síncronos N° 3 y 4 (15,000 HP cada uno) tienen un bobinado en su estator del tipo ondulado, con 56 polos, doble capa (2 bobinas por ranura), 56 grupos polares por fase de 6 bobinas cada uno, 480 ranuras, y paso de 18 bobinas. En las 480 ranuras están contenidas las 480 bobinas (160 bobinas por fase).

Figura 45

Distribución de bobinado del estator

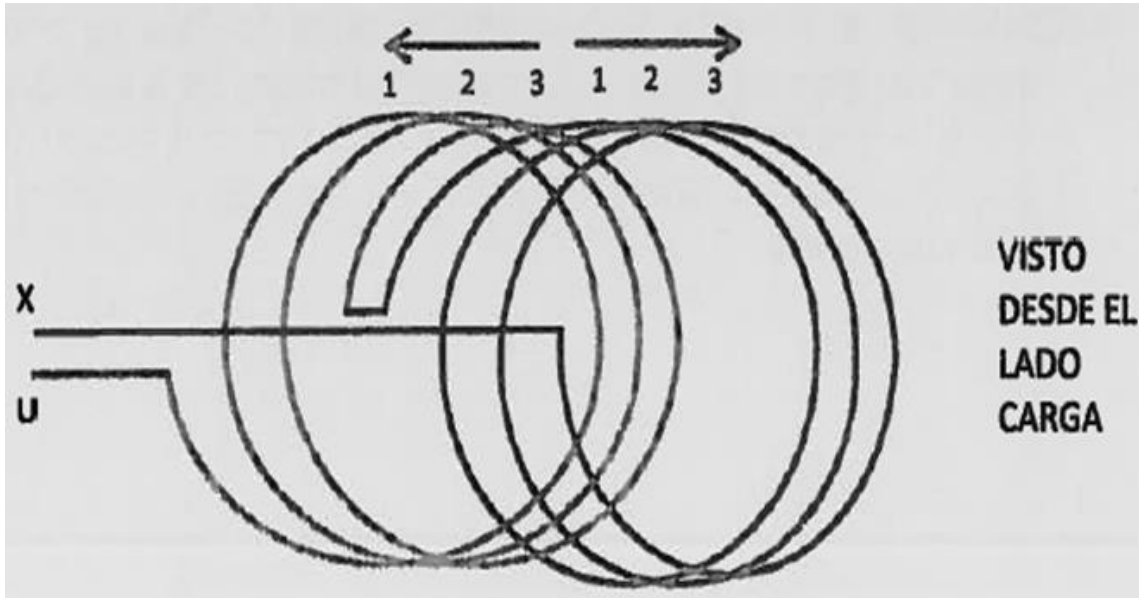


Nota: Elaboración propia.

El bobinado ondulado de cada fase completa 6 vueltas alrededor de la circunferencia del estator, las primeras 3 vueltas en un sentido, visto del lado descarga del GMD (U y W en el sentido horario, mientras que V en el sentido antihorario) y las últimas 3 vueltas en el sentido contrario, visto del lado descarga del GMD (U y W en el sentido antihorario, mientras que V en el sentido horario), y es en este cambio de giro donde se ubica la parte media del bobinado del estator, la cual se intervendrá con las modificaciones necesarias para esta implementación propuesta.

Figura 46

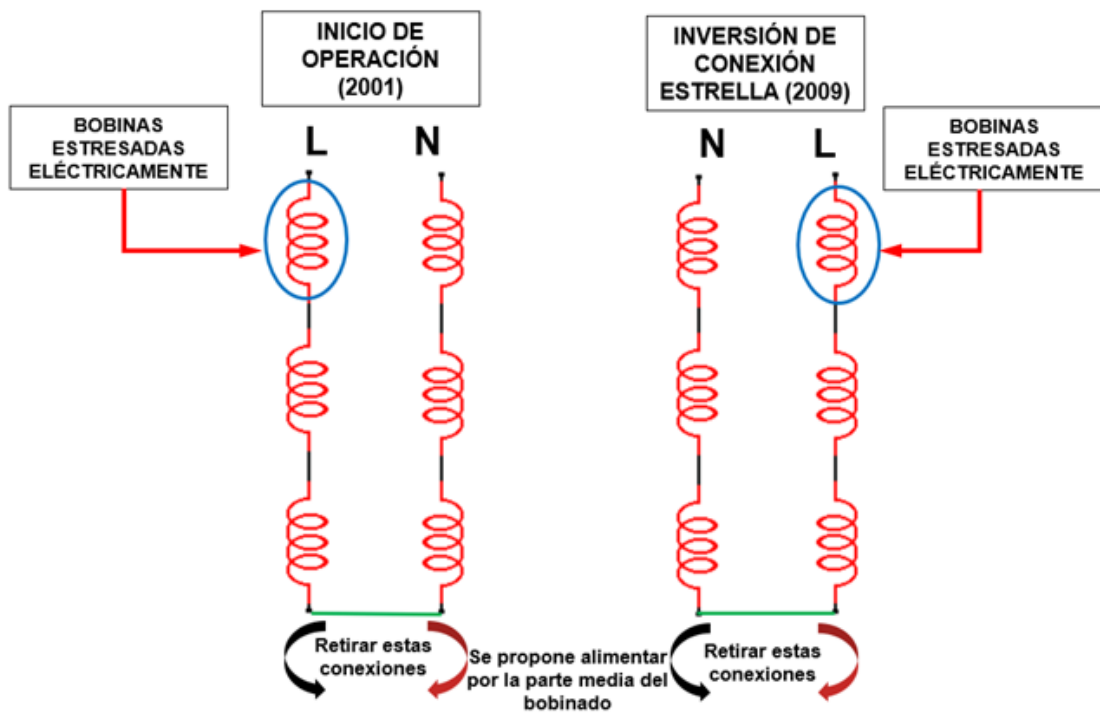
Esquema de las 6 vueltas del bobinado de cada fase del estator (visto del lado carga del GMD)



Nota: Elaboración propia.

Figura 47

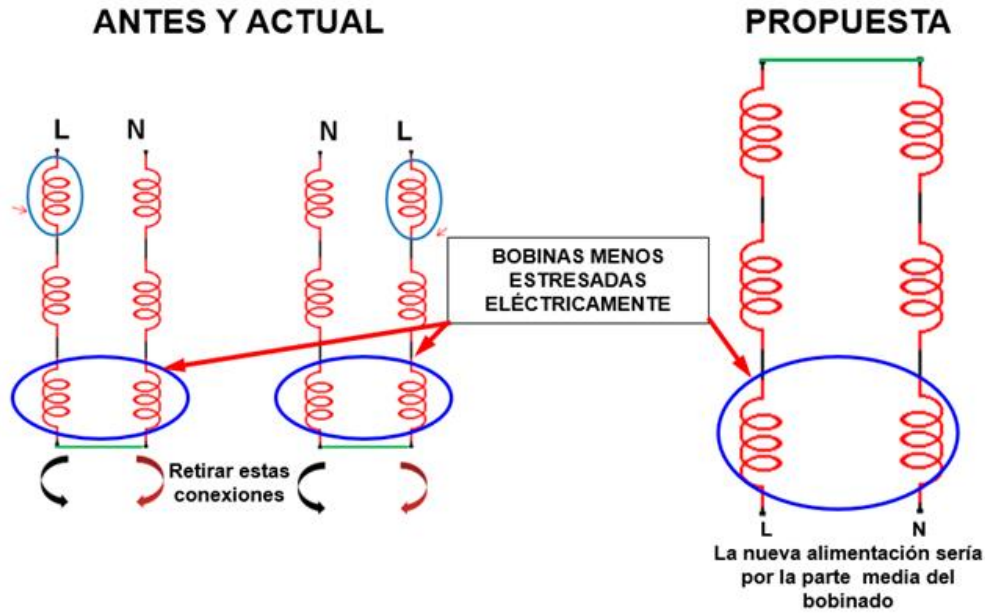
Diagrama esquemático del bobinado del estator



Nota: Elaboración propia.

Figura 48

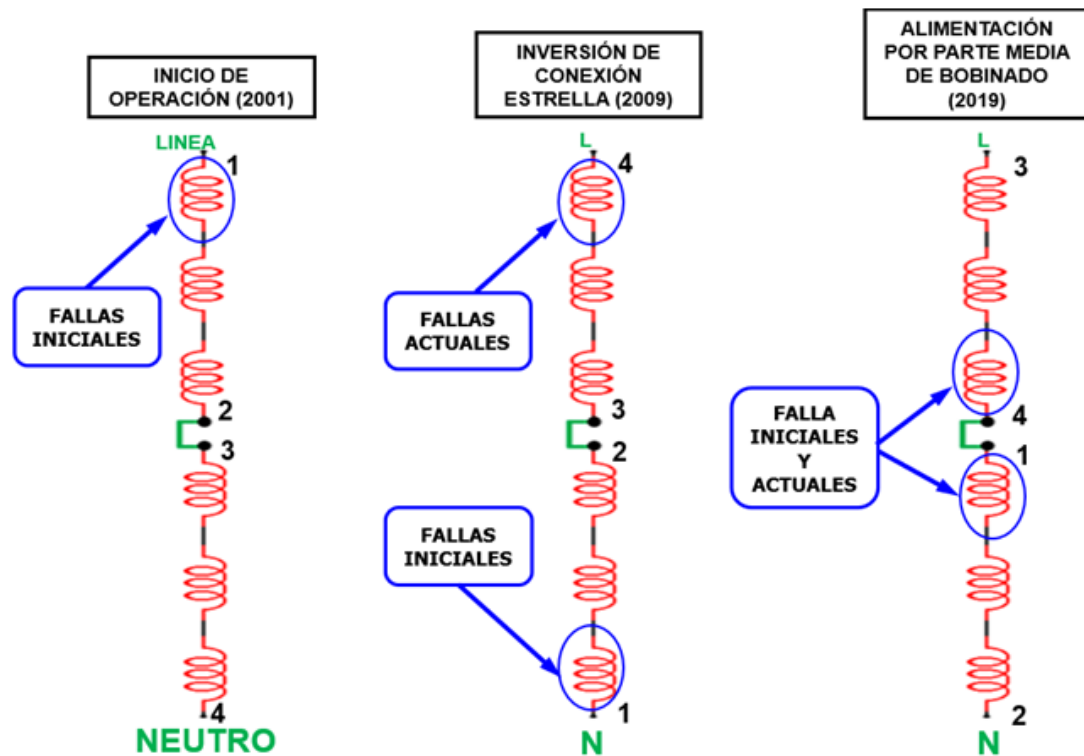
Diagrama esquemático de reconfiguración del bobinado del estator alimentado por la parte media



Nota: Elaboración propia.

Figura 49

Diagrama esquemático del bobinado del estator

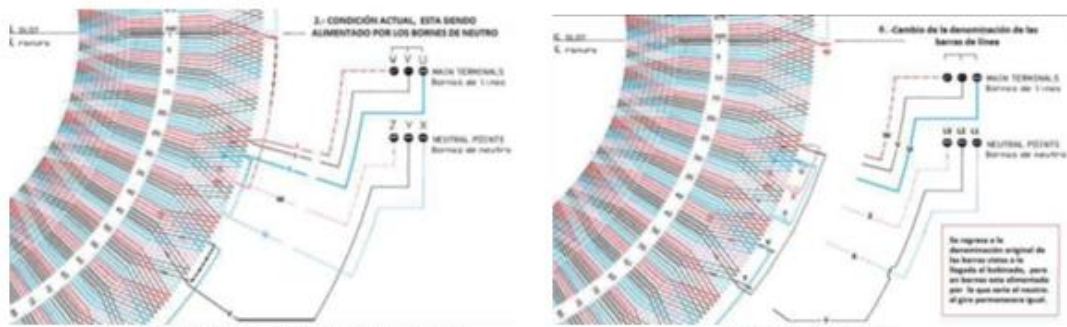


Nota: Elaboración propia.

En el caso de los motores eléctricos síncronos N° 3 y N° 4 (15,000 HP), se implementó la modificación del neutro del bobinado del estator, en enero 2019 y octubre 2019 respectivamente.

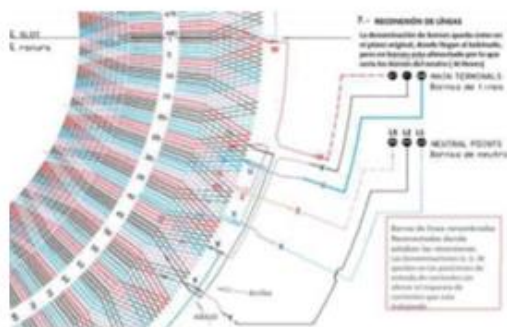
Figura 50

Proceso de modificación del neutro del bobinado del estator



Condición de conexiones encontradas

Desconexiones



Instalación de nuevas conexiones



Identificación de conexiones originales



Retiro de aislamiento de conexiones originales



Corte de conexiones originales



Desoldado de conexiones originales



Recuperación de conexiones retiradas



Recuperación de conexiones retiradas



Vista de conexión nueva "V"



Soldadura de conexión nueva "X"



Vista de conexión nueva "Y"



Encintado de conexiones nuevas



Aplicación de esmalte antiflash a conexiones nuevas

Nota: Elaboración propia.

Luego de esta implementación, se estima incrementar la vida útil del aislamiento del bobinado del estator mínimamente entre 6.5 a 9 años, tal como sucedió con la primera inversión de la conexión estrella del bobinado, siempre y cuando se mantengan las mismas condiciones operativas y de mantenimiento, así como las estrategias operativas implementadas e indicadas anteriormente.

Con esta modificación del neutro del bobinado del estator, no se tiene alguna afectación a las vibraciones y eficiencia del motor eléctrico, puesto que también se mantiene la configuración del bobinado del estator.

3.3.3 Protocolo 3: Inversión del neutro modificado del bobinado del estator

Próximamente, con la finalidad de seguir incrementando la vida útil del motor eléctrico, se iniciará nuevamente el proceso de fallas a tierra del aislamiento del bobinado del estator, entonces se tendrá que las bobinas más próximas a la nueva conexión de línea o de alimentación (U'', V'', W'') estarán más envejecidas y estresadas eléctricamente que las bobinas más próximas a la nueva conexión del neutro (X'', Y'', Z''), por lo tanto se recomienda implementar una nueva inversión del neutro del estator, similar a la del protocolo 1, realizada en una primera oportunidad con las conexiones de línea originales (U, V, W) y las conexiones de neutro originales (X, Y, Z), tal como se explicó anteriormente, para lo cual será necesario restablecer el seccionador tipo cuchilla del estator (knife switch) a su condición original o de fábrica. Con esto, se podrá incrementar la vida útil del aislamiento del bobinado del estator hasta en 6.5 a 9 años más, con un presupuesto mucho menor que cualquiera de las soluciones integrales indicadas en la sección 3.4.

Es decir, si combinamos las propuestas de la inversión y la modificación del neutro del bobinado del estator, tendremos un incremento de la vida útil del aislamiento del estator de hasta cuatro veces su vida útil inicial (1er. período de vida), según la siguiente tabla:

Tabla 12

Períodos de vida útil del aislamiento con inversión y modificación del neutro

Período	Inicio de período	Fin de período	Conexión del neutro
1	Inicio de vida útil (motor nuevo)	Primera inversión del neutro	U, V, W
2	Primera inversión del neutro	Modificación del neutro	U', V', W'
3	Modificación del neutro	Segunda inversión del neutro	U'', V'', W''
4	Segunda inversión del neutro	Final de vida útil	U''', V''', W'''

Nota: Elaboración propia

Finalmente, es posible seguir incrementando la vida útil del aislamiento del bobinado del estator realizando nuevas modificaciones del neutro, tantas veces como vueltas tenga dicho bobinado ondulado, puesto que las bobinas más próximas a las nuevas conexiones de línea o de alimentación no están envejecidas al no estar estresadas eléctricamente, ya que no han estado tensionadas al voltaje nominal, donde aparecen descargas parciales.

3.3.4 Fallas y Efecto de la Inversión del Neutro

Actualmente las reparaciones se abordan con mantenimientos correctivos.

Tabla 13*Comparativa de Fallas y Efecto de la Inversión y Modificación del Neutro*

Motor	Inversión del Neutro	Modificación del Neutro	Fechas de implementación de Modificación del Neutro	Total, Fallas Antes de inversión	Total, Fallas Después de inversión	Vida Útil Antes de inversión (días)	Vida Útil Después de inversión (días)	Vida Útil Después de modificación (días)	Incremento Después de inversión (%)	Incremento Después de modificación (%)	Impacto en Disponibilidad
Motor 1	Sí	No	---	9	0	2342	1638	(¹)	-30.06% (¹)	(¹)	(¹)
Motor 2	Sí	No	---	5	5	1211	2430	(²)	100.66%	(²)	Alto
Motor 3	Sí	4	14/02/2019	4	2	1990	2425	1214	21.86%	-38.99% (³)	Medio
Motor 4	Sí	3	18/10/2019	3	6	1742	3188	2120 (⁴)	83.01%	21.70%	Alto

Nota: *Elaboración propia.*

(¹) No se observa incremento en la vida útil después de la inversión del neutro por haberse reemplazado el estator en setiembre de 2013.

(²) No se realizó la modificación del neutro por haberse reemplazado el estator en noviembre de 2019.

(³) No se observa incremento en la vida útil después de la modificación del neutro por haberse reemplazado el estator en junio de 2022.

(⁴) La vida útil después de la modificación del neutro se contabilizó hasta la fecha actual, por lo que sigue sumando vida actualmente.

3.4 Soluciones integrales

Las reparaciones de las fallas de aislamiento del bobinado del estator, mostradas anteriormente, ya sea por reemplazo de la bobina fallada o puenteo de la bobina fallada no garantiza que otra bobina pueda volver a fallar próximamente, mientras se mantengan las mismas condiciones de operación del motor eléctrico, puesto que todo el bobinado ha estado y seguirá estando sometido a estrés eléctrico, y en especial las bobinas más próximas a la conexión de la alimentación o línea de las 3 fases (U, V, W), las cuales soportan la mayor tensión eléctrica en un circuito con configuración o conexión estrella, a diferencia de las bobinas más próximas a la conexión del neutro de la estrella (X, Y, Z), que son las que están sometidas a menor estrés eléctrico. Lo anterior se cumple puesto que generalmente en los motores eléctricos (asíncronos o síncronos) la conexión del neutro de la estrella no está conectado a tierra, sino que es flotante, y como ya se ha mencionado, el gradiente de potencial en todo el recorrido del bobinado va disminuyendo desde la conexión de línea hasta la conexión de neutro.

En ese sentido, como se ha mostrado, los 4 motores eléctricos síncronos de gran potencia han evidenciado hasta 9, 10, 6 y 9 fallas a tierra del aislamiento de diferentes bobinas de su estator respectivamente, en diferentes eventos, ocasionando varios días de indisponibilidad y pérdidas de producción.

En suma, una solución integral para evitar las continuas fallas a tierra del aislamiento del bobinado del estator es reemplazar justamente todo el conjunto del bobinado, que ya está estresado eléctricamente, ya sea con un rebobinado del estator (reemplazar todas las bobinas existentes) o reemplazar el estator en su conjunto (núcleo magnético, armazón del núcleo magnético, y el mismo bobinado). La decisión final se tomará en función a un análisis técnico-económico a desarrollar, para luego planificar oportunamente los recursos necesarios con anticipación a la ejecución del proyecto.

Rebobinado del estator

Consiste en reemplazar todas las bobinas o barras existentes en la circunferencia del estator (núcleo magnético). Los recursos requeridos para este trabajo dependerán principalmente de las dimensiones del motor eléctrico, lo cual amerita una planificación adecuada.

Con este rebobinado del estator, se tiene una mejora en la disponibilidad y confiabilidad del motor eléctrico.

Figura 51

Proceso de rebobinado del estator



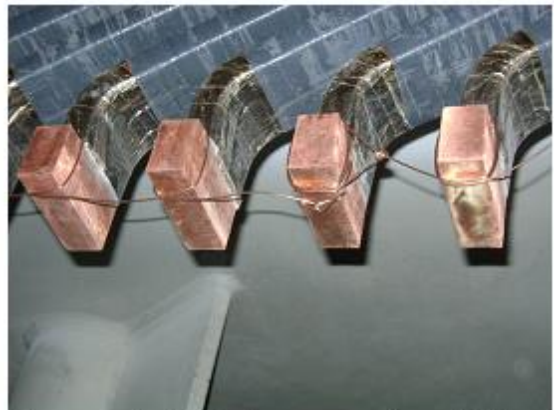
Estructura de andamios y cubiertas para encerramiento de lugar de trabajo



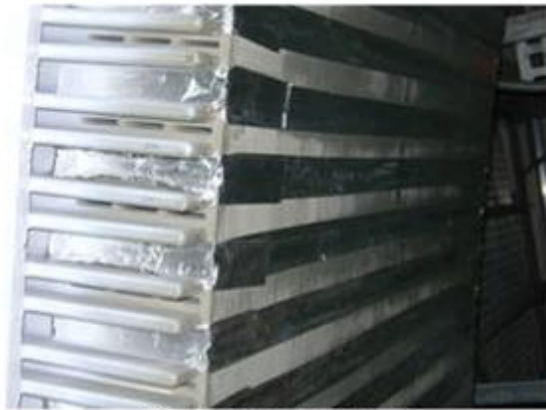
Vista de interior del encerramiento de lugar de trabajo



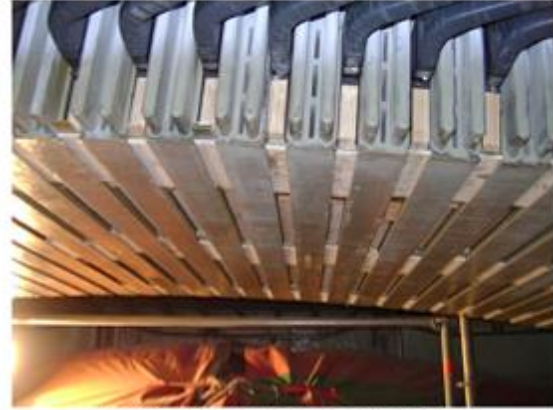
Barras nuevas con proceso VPI



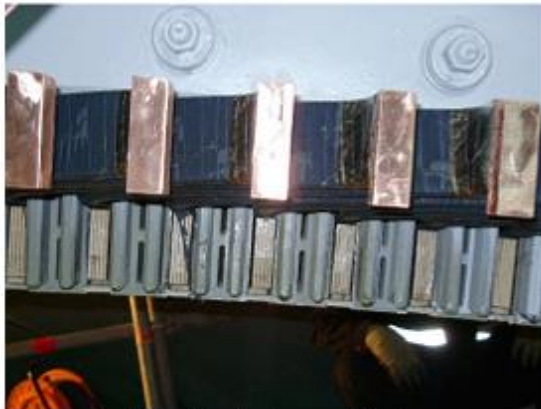
Barras cortocircuitadas para prebas eléctricas



Preparación de ranuras



Instalación de barras superiores



Instalación de barras inferiores



Instalación de barras superiores

Nota: Elaboración propia.

Reemplazo del estator

Consiste en reemplazar el estator en su conjunto (núcleo magnético, armazón del núcleo magnético, bobinas). En la experiencia, se ha visto que muchas veces se decide por la solución integral de reemplazar el estator en su conjunto, que a pesar de ser más costosa que el rebobinado del estator, puede demorar igual o hasta menos tiempo, con la ventaja de no solo eliminar la causa raíz del problema (mejorar el sistema de aislamiento del bobinado del estator con VPI), sino traer consigo, mejoras en todo el estator además del bobinado, como mejoramiento de los componentes del núcleo magnético del estator (láminas, barras transversales, placas de sujeción, espárragos de apilamiento, instrumentación especializada, etc.), sumado a que en paralelo se podrían realizar otras actividades, como la modernización de la sala eléctrica (sistemas de potencia y control) y circuitos de alimentación del motor eléctrico.

Los recursos requeridos para este trabajo dependerán principalmente de las dimensiones del motor eléctrico, lo cual amerita una planificación adecuada.

En el caso de los motores eléctricos síncronos N° 1, 2 y 3 (27,000 HP, 15,000 HP y 15,000 HP respectivamente), se implementó la solución integral de reemplazo del estator en setiembre 2013, noviembre 2019 y junio 2022 respectivamente, con un nuevo bobinado fabricado con sistema de aislamiento VPI.

Con este reemplazo del estator, se tiene una mejora en la disponibilidad y confiabilidad del motor eléctrico.

Figura 52

Proceso de reemplazo del estator



Armado de andamios alrededor del rotor



Escaleras para acceso al estator



Retiro de un cuadrante del estator



Ingreso de un cuadrante



Reacufiando de ranuras del nuevo estator



Cordones de amarre de bobinas



Vista de cabezas de bobinas



Inyección de resina en cordones de arrame

Nota: Elaboración propia.

CAPÍTULO IV

Resultados, Contrastación de Hipótesis y Discusión

4.1 Resultados

A continuación, se presenta una tabla con un análisis cronológico y estadístico de tres periodos de tiempo claramente definidos; para el motor eléctrico síncrono N° 4 (15,000 HP). Como se puede apreciar, los periodos se identifican como "Período 1", "Período 2" y "Período 3", cada uno con fechas de inicio y fin específicas, haciendo referencia a las fechas de inicio de operación del motor síncrono e inicio de las fallas del aislamiento del bobinado del estator respectivamente (vida útil del aislamiento), según lo mostrado en la tabla 13.

Se evalúan las siguientes métricas en cada periodo:

- ✓ **L (días):** Cantidad total de días contabilizados en cada periodo.
- ✓ **L (h):** Total de horas calculadas con base a los días de cada periodo.
- ✓ **E (Vac):** Voltajes promedio de alimentación del motor eléctrico síncrono N° 4, durante los periodos indicados (vida útil del aislamiento). No se considera directamente la rigidez dieléctrica del aislamiento (E en kV/mm), puesto que el espesor del aislamiento es constante en todo el bobinado por diseño del fabricante de los motores eléctricos síncronos.

Hay que recordar que el envejecimiento del aislamiento por estrés eléctrico corresponde a la fórmula (2) del estrés eléctrico, siempre y cuando haya descargas parciales, que es nuestro caso, alrededor del voltaje nominal.

A continuación, la fórmula del estrés eléctrico:

$$L = c \cdot E^{-n} \quad (2)$$

Nota: Tomado de: Stone, G. C., Boulter, E. A., Culbert, I., & Dhirani, H. (2004). *Electrical insulation for rotating machines: Design, evaluation, aging, testing, and repair*. IEEE Press.

Para el primer período:

$$L_1 = c \cdot E_1^{-n} \quad (3)$$

Para el segundo período:

$$L_2 = c \cdot E_2^{-n} \quad (4)$$

Dividiendo ambas ecuaciones (4) y (5):

$$L_1/L_2 = (E_1/E_2)^{-n} \quad (5)$$

Despejando "n":

$$n = - \frac{\log(L_1/L_2)}{\log(E_1/E_2)} \quad (6)$$

Reemplazando "n" en cualquiera de las ecuaciones anteriores:

$$c = \frac{L_1}{(E_1)^{-n}} = \frac{L_2}{(E_2)^{-n}} \quad (7)$$

Tabla 14

Cálculo de envejecimiento de aislamiento de estator en motor síncrono N° 4

	Período 1	Período 2	Período 3
Inicio	01/06/2001	11/02/2009	18/10/2019
Fin	0903/2006	15/03/2017	04/02/2027
L (días)	1742	2954	
L (h)	41808	70896	
E (Vac)	2986.68	2785.80	2823.66
n	7.577634476		
c	9.01968E+30		Vida útil
c	9.01968E+30	h	64002
		Días	2667
			04/02/2027

Nota: Elaboración propia.

Esta tabla presenta el cálculo del envejecimiento del aislamiento del estator del motor síncrono N° 4, evaluado en tres periodos diferentes. Se muestran los días de vida útil obtenidos en cada etapa, el promedio de voltaje aplicado (E), así como los parámetros de la fórmula del estrés eléctrico (n y c). Los resultados permiten observar que, a pesar de pequeñas variaciones en el voltaje, el periodo 3 presenta una expectativa de vida

significativamente mayor, alcanzando 64002 horas o 2667 días, lo que evidencia el efecto positivo de la modificación del neutro en la prolongación de la vida del aislamiento.

Cálculo del Incremento de vida útil del aislamiento (%):

La fórmula se aplica en el cálculo de los motores analizados:

Después de inversión del neutro

Motor N° 1:

No es posible calcular este incremento puesto que no hubo fallas después de la inversión del neutro por haberse reemplazado el estator en setiembre 2013.

Motor N° 2:

- ✓ Vida Útil antes: 1211 días
- ✓ Vida Útil después: 2430 días
- ✓ Cálculo:

$$\text{Incremento (\%)} = \left(\frac{2430-1211}{1211} \right) * 100 = 100.66\%$$

Motor N° 3:

- ✓ Vida Útil antes: 1990 días
- ✓ Vida Útil después: 2425 días
- ✓ Cálculo:

$$\text{Incremento (\%)} = \left(\frac{2425-1990}{1990} \right) * 100 = 21.86\%$$

Motor N° 4:

- ✓ Vida Útil antes: 1742 días
- ✓ Vida Útil después: 3188 días
- ✓ Cálculo:

$$\text{Incremento (\%)} = \left(\frac{3188-1742}{1742} \right) * 100 = 83.01\%$$

Después de modificación del neutro

Motor N° 1:

No es posible calcular este incremento puesto que no hubo fallas después de la inversión del neutro por haberse reemplazado el estator en setiembre 2013.

Motor N° 2:

No es posible calcular este incremento puesto que no hubo fallas después de la modificación del neutro por haberse reemplazado el estator en noviembre 2019.

Motor N° 3:

No es posible calcular este incremento puesto que no hubo fallas después de la modificación del neutro por haberse reemplazado el estator en junio 2022.

Motor N° 4:

- ✓ Vida Útil antes: 1742 días
- ✓ Vida Útil después: 2120 días
- ✓ Cálculo:

$$\text{Incremento (\%)} = \left(\frac{2120-1742}{1742} \right) * 100 = 21.70\%$$

Estos cálculos de incrementos de vida útil después de la inversión y modificación del neutro se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 15*Comparativa Incremento de Vida Útil del aislamiento*

Motor	Vida Útil Antes de inversión (días)	Vida Útil Después de inversión (días)	Vida Útil Después de modificación (días)	Incremento Después de inversión (%)	Incremento Después de modificación (%)
Motor 1	2342	1638	(¹)	-30.06% (¹)	(¹)
Motor 2	1211	2430	(²)	100.66%	(²)
Motor 3	1990	2425	1214	21.86%	-38.99% (³)
Motor 4	1742	3188	2120 (⁴)	83.01%	21.70%

Nota: *Elaboración propia.*

(¹) No se reporta la vida útil después de la modificación del neutro en el motor 1 porque el estator fue reemplazado por completo en septiembre de 2013, imposibilitando la medición bajo la misma línea base.

(²) En el caso del motor 2, no se realizó la modificación del neutro, ya que el estator fue reemplazado en noviembre de 2019.

(³) Para el motor 3, la vida útil después de la modificación se limitó hasta junio de 2022, fecha en la que también se reemplazó el estator.

(⁴) La vida útil posterior a la modificación del neutro en el motor 4 se encuentra en curso, ya que no se ha producido aún un reemplazo del estator. Por tanto, el dato consignado corresponde al acumulado vigente hasta la fecha de corte del análisis (04 de agosto del 2025).

4.2 Análisis general de la Comparativa

Los datos presentados en la tabla 15 evidencian cambios importantes en el desempeño de los motores tras aplicar la metodología. A continuación, se detallan algunos puntos clave basados en los cálculos realizados:

Incremento en la Vida Útil del aislamiento:

- ✓ El aumento en la Vida Útil se convierte en un indicador importante para medir la fiabilidad y estabilidad de los motores.
- ✓ Aunque todos los motores mejoraron su Vida Útil, según la tabla 15, los porcentajes varían, dejando en evidencia cómo las características propias de cada equipo influyen en los resultados obtenidos.

Interpretación de los Resultados:

- ✓ Los registros confirman que la metodología implementada redujo de manera notable la frecuencia de fallas en la mayoría de los motores evaluados.
- ✓ A pesar de los avances logrados, los resultados sugieren que ciertos motores podrían beneficiarse de ajustes adicionales para alcanzar mayores mejoras. Esto se debe a diferencias en los niveles de voltaje a los que están alimentados estos motores eléctricos.

Impacto Operativo y Económico:

- ✓ Al reducir las fallas, se logra no solo disminuir los costos relacionados con el mantenimiento correctivo, sino también optimizar los recursos utilizados en la operación diaria. (Rojas, 2010).
- ✓ Este aumento en la confiabilidad de los motores, según la tabla 15, se traduce en una operación más fluida, con menores tiempos de inactividad y un uso más eficiente de los equipos. Lo que refuerza la sostenibilidad operativa y generación de beneficios tanto técnicos como económicos para el sistema de manera global.

A través de histogramas, se evaluaron las mejoras en la Vida Útil del aislamiento, antes y después de la intervención (inversión y modificación del neutro del estator), lo que permitió cuantificar el impacto de la metodología implementada. Este enfoque facilitó la identificación de tendencias, variabilidad y la influencia de valores extremos en la muestra, proporcionando una base sólida para la interpretación de los resultados y la toma de decisiones estratégicas.

4.3 Contrastación de Hipótesis

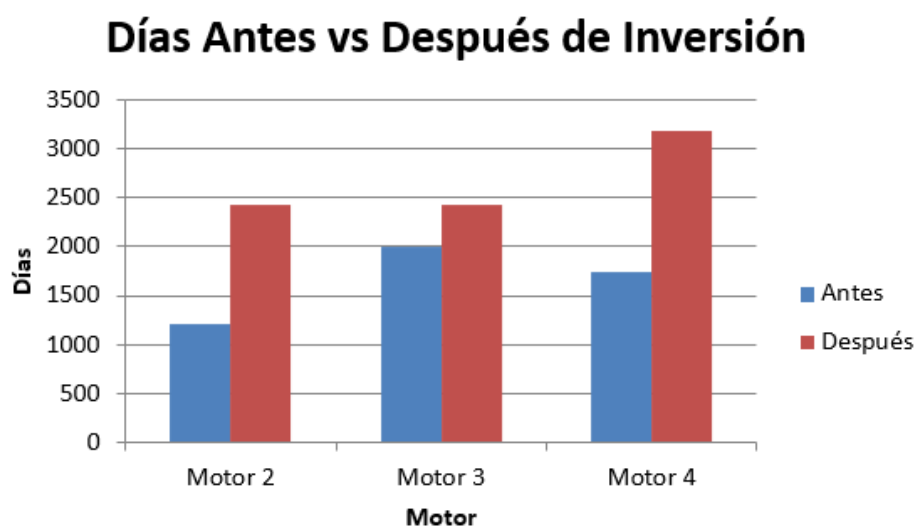
Este análisis se organizó en torno a las tres hipótesis que se sostienen en la presente investigación, cada una presentada mediante cuadros comparativos y gráficos de barras elaborados en Excel. Estas representaciones permiten evidenciar de manera clara las diferencias en la vida útil del aislamiento antes y después de las intervenciones aplicadas.

Se plantea la Hipótesis Nula (H_0) para la presente investigación de que “la modificación del neutro del estator NO incrementará la vida útil del aislamiento de motores eléctricos síncronos de gran potencia”.

En el caso de la hipótesis 1, se realizó la comparación entre los días de vida útil registrados antes y después de la inversión del neutro del estator en los motores 2, 3 y 4. Los resultados permiten observar un incremento sustancial, lo cual respalda la efectividad técnica de esta intervención en la prolongación de la vida útil del aislamiento, rechazándose de esta forma la hipótesis nula.

Figura 53

Comparación de la vida útil del aislamiento antes y después de la inversión del neutro del estator en los motores 2, 3 y 4

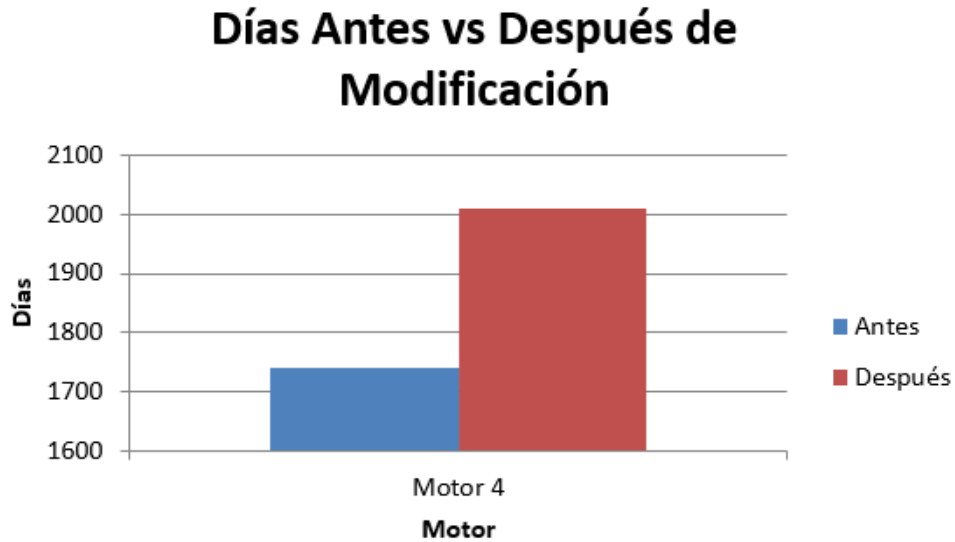


Nota: Elaboración propia

Respecto a la hipótesis 2, el análisis se centró exclusivamente en el motor 4, evaluando los días de vida útil obtenidos antes y después de la modificación posterior a la inversión. Esta comparación permitió verificar si la segunda intervención genera un efecto adicional sobre el rendimiento del aislamiento. Los resultados reflejan una mejora, que complementa el efecto de la inversión inicial, rechazándose de esta forma la hipótesis nula.

Figura 54

Comparación de la Vida Útil del Aislamiento Antes y Después de la Modificación del Neutro motor 4

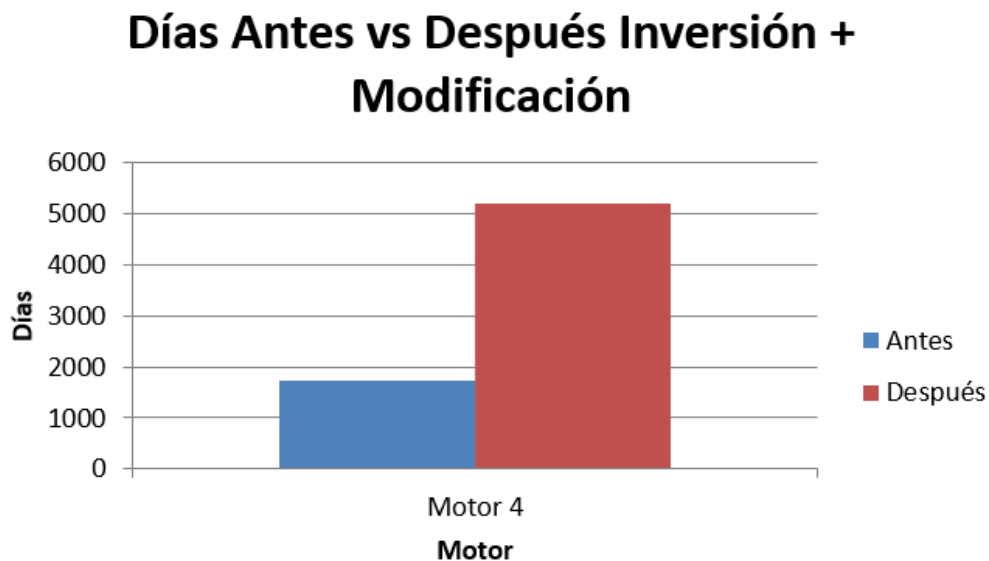


Nota: Elaboración propia

Finalmente, en la hipótesis general, se analizó de manera acumulada el comportamiento del motor 4, considerando como valor inicial la vida útil previa a cualquier intervención, y como resultado final la sumatoria de los días obtenidos tras la inversión y la posterior modificación del neutro. Los resultados de esta comparación global muestran una mejora en la vida útil del aislamiento del bobinado, rechazándose la hipótesis nula.

Figura 55

Comparación de días antes y después de la inversión más la modificación del motor 4



Nota: Elaboración propia

Los gráficos comparativos permiten visualizar de forma directa las diferencias en cada fase del proceso (protocolos de implementación del punto 3.3), reforzando la interpretación de los datos numéricos y proporcionando una base clara para la discusión de los resultados en la siguiente sección.

4.4 Discusión

Los resultados obtenidos confirman la eficacia de la metodología de inversión y modificación del neutro del estator para prolongar la vida útil del aislamiento en motores eléctricos síncronos de gran potencia. Esto se refleja en el aumento considerable de su vida útil, a partir de la disminución del voltaje de alimentación y por ende la disminución de las descargas parciales, que envejecen el aislamiento por estrés eléctrico.

Estos hallazgos refuerzan la propuesta técnica como una solución práctica y sostenible para problemas recurrentes en motores esenciales.

En comparación con los antecedentes, esta investigación no solo complementa, sino que también amplía el conocimiento técnico previo. García (2024) demostró que el aislamiento se degrada de gran manera después de 700 horas de operación a

temperaturas extremas. La presente tesis muestra cómo la inversión y modificación del neutro reduce estos efectos al redistribuir tensiones eléctricas, protegiendo el aislamiento de daños acelerados y prolongando su funcionalidad.

Por otro lado, los estudios de Trujillo (2023) y Mollisaca (2020), que resaltaron los beneficios del mantenimiento predictivo para evitar fallas, se alinean con los resultados aquí presentados. Sin embargo, esta investigación introduce una gran innovación que no solo previene fallas, sino que también mejora la estabilidad operativa al extender el tiempo entre reparaciones y disminuir los periodos de inactividad.

Investigaciones previas, como las de Torres *et al.* (2019) y Saico (2023) hacen referencia y resaltan la relevancia de monitorear parámetros clave como temperatura y vibraciones para mantener la integridad del aislamiento. En este contexto, la presente investigación aporta una ventaja adicional al demostrar que la modificación del neutro optimiza la distribución de tensiones internas, evitando fallas críticas y mejorando la confiabilidad operativa.

En ese sentido, desde una perspectiva técnica y económica, este trabajo se alinea con las conclusiones de Herrera (2019) y Chocanapi (2019) quienes señalaron que estrategias eficientes de mantenimiento reducen costos y aumentan la continuidad operativa. En este caso, la reducción en la frecuencia de fallas no solo minimiza gastos correctivos, sino que también maximiza la productividad al mantener los sistemas funcionando sin interrupciones.

Por consiguiente, esta investigación no solo valida la utilidad de la metodología, sino que también abre nuevas posibilidades para mejorar la eficiencia y sostenibilidad de los motores eléctricos síncronos. Estos resultados invitan a desarrollar futuros estudios enfocados en integrar tecnologías avanzadas de monitoreo y análisis para perfeccionar aún más esta solución, asegurando así un desempeño óptimo en entornos industriales de alta exigencia.

Conclusiones

Se cumplió con el objetivo general planteado, según lo mostrado en la tabla 11, incrementando la vida útil del aislamiento implementando la metodología de modificación del neutro del estator (inversión y modificación), de hasta 9 años sin fallas en el caso del motor síncrono N° 4.

Asimismo, se logró cumplir con el primer objetivo específico, en donde se evidenció que la metodología de inversión del neutro del estator incrementa la vida útil del aislamiento, tal como lo demuestran los resultados de la tabla 11 para los motores síncronos N° 2, 3 y 4, de hasta 6.5 años, 6.5 años y 9 años sin fallas respectivamente.

También, se logró cumplir con el segundo objetivo específico, en donde la metodología de modificación del neutro del estator también incrementa la vida útil del aislamiento, tal como lo demuestran los resultados de la tabla 15 para el motor síncrono N° 4, incrementando hasta 21.70% la vida útil inicial de su aislamiento.

Se demostró la hipótesis general, que la modificación del neutro del estator (inversión y modificación) incrementó la vida útil del aislamiento de motores eléctricos síncronos de gran potencia, llegando hasta un 104.71% de incremento en el motor síncrono N° 4 (83.01% con la inversión del neutro y 21.70% con la modificación del neutro).

También, se demostró las hipótesis específicas, primero que la inversión del neutro del estator incrementó la vida útil del aislamiento de motores eléctricos síncronos de gran potencia, llegando hasta 100.66% de incremento en el motor síncrono N° 2, y segundo que la modificación del neutro del estator incrementó la vida útil del aislamiento de motores eléctricos síncronos de gran potencia, llegando hasta 21.70% de incremento en el motor síncrono N° 4.

Con los datos mostrados en la tabla 14 y con la fórmula del estrés eléctrico se calculó el envejecimiento del aislamiento de estator en motor síncrono N° 4, y se puede predecir

la expectativa de vida o vida remanente del aislamiento de este motor eléctrico por estrés eléctrico.

La investigación desarrollada confirmó que aplicar la inversión y modificación del neutro del estator constituye una solución técnica eficaz y novedosa para extender la vida útil del aislamiento en motores eléctricos síncronos de gran potencia. A lo largo del estudio, se observó una mejora considerable en la confiabilidad operativa, respaldada por incrementos notables en la vida útil del aislamiento del bobinado del estator, reflejando no solo el impacto técnico de la intervención, sino también su valor estratégico para el mantenimiento industrial.

Al contrastar estos hallazgos con antecedentes, se advierte que este enfoque supera a las técnicas tradicionales. Investigaciones como la de García (2024) evidencian el deterioro progresivo del aislamiento bajo condiciones térmicas extremas, mientras que esta propuesta ofrece una alternativa que redistribuye las tensiones internas del sistema, reduciendo la degradación y prolongando la operatividad sin interrupciones críticas.

Desde el punto de vista económico, los beneficios también resultan evidentes. Menor frecuencia de fallas se traduce en una reducción sustancial de costos por mantenimiento correctivo, además de un mejor aprovechamiento del tiempo productivo. Esto convierte a la metodología en una inversión acertada, especialmente en sectores industriales donde la continuidad operativa es prioritaria.

Adicionalmente, los beneficios económicos derivados de esta metodología son contundentes. La reducción de la frecuencia de fallas disminuye los costos operativos y de reparación, al tiempo que optimiza la productividad industrial. Por lo tanto, esta solución técnica representa no solo un avance tecnológico, sino también una inversión estratégica rentable para sectores industriales críticos.

En síntesis, esta investigación no solo aporta una solución concreta a un problema técnico recurrente, sino que también amplía las posibilidades de intervención preventiva

y predictiva en sistemas eléctricos de alto rendimiento, abriendo camino a nuevas líneas de investigación aplicadas en entornos industriales complejos.

RECOMENDACIONES

En base a los hallazgos obtenidos en la presente investigación, se plantean las siguientes recomendaciones, directamente relacionadas con las conclusiones del estudio:

1. **Implementar de forma progresiva la metodología de modificación del neutro del estator (inversión y modificación) en motores eléctricos síncronos de gran potencia**, siguiendo los protocolos mostrados en el punto 3.3, dado que se comprobó un incremento de hasta 104.71 % en la vida útil del aislamiento (motor síncrono N° 4), lo cual representa una mejora sustancial en la confiabilidad operativa y eficiencia técnica del equipo.
2. **Desarrollar investigaciones complementarias orientadas a implementar el Protocolo 3 de esta metodología (inversión del neutro modificado del estator)**, por ser una solución innovadora, similar al protocolo 1, y extender la vida útil del aislamiento.
3. **Implementar nuevas modificaciones del neutro del estator para seguir incrementando la vida útil del aislamiento del bobinado**, según lo mostrado en la tabla 12, tantas veces como vueltas tenga dicho bobinado ondulado.
4. **Implementar estrategias operativas adicionales para contribuir al incremento de la vida útil del aislamiento del bobinado del estator**, como por ejemplo:
 - ✓ Control de límites de voltaje de operación de los motores eléctricos.
 - ✓ Inclusión de la limpieza manual del bobinado del estator, inspección de espárragos del núcleo magnético, inspección de láminas del núcleo magnético, pruebas eléctricas AC/DC y medición de Descargas Parciales (DP), en el Plan de Mantenimiento de estos motores eléctricos.
 - ✓ Instalación de equipo de Descargas Parciales en línea en los motores eléctricos.

5. **Ampliar el estudio a otros tipos de bobinados (imbricados, concéntricos, distribuidos, etc.),** siguiendo el mismo enfoque metodológico aplicado a bobinados ondulados, con el objetivo de extender los beneficios observados en este estudio a una gama más amplia de motores industriales.
6. **Continuar realizando estimaciones de la vida útil del aislamiento del estator en motores eléctricos,** a partir del envejecimiento por estrés eléctrico, según lo mostrado en la tabla 14, para predecir su vida remanente.
7. **Desarrollar investigaciones complementarias además del envejecimiento por estrés eléctrico,** incluyendo otros factores de envejecimiento, como el estrés térmico, estrés mecánico y estrés ambiental.
8. **Incorporar sistemas de monitoreo en tiempo real para el aislamiento del estator,** ya que los resultados muestran que una mejora temprana en la detección de fallas permite intervenciones oportunas, reduce fallas críticas y mejora la continuidad operativa.
9. **Realizar análisis técnico-económicos detallados sobre los costos evitados y el aumento de productividad asociado a la metodología aplicada,** pues la reducción en la frecuencia de fallas y el incremento en la disponibilidad de equipos sugieren beneficios económicos significativos para las operaciones industriales.
10. **Fomentar proyectos de investigación orientados al desarrollo de materiales de aislamiento más resistentes y compatibles con la metodología propuesta,** como una línea de investigación derivada que refuerce los efectos positivos ya obtenidos y potencie aún más la vida útil del sistema eléctrico.
11. **Promover la transferencia tecnológica y la capacitación técnica sobre esta metodología en plantas industriales,** considerando que su implementación no solo mejora la durabilidad del aislamiento, sino que también representa una

inversión estratégica con alta rentabilidad para sectores donde la confiabilidad operativa es prioritaria.

Referencias

- ABB. (2010). *El accionamiento sin engranajes para molinos (GMD)*.
https://library.e.abb.com/public/a935a0eb1ed95f6e8325779f002d3cc1/ABB_GM_D_3BHS_490_275_spanish_LR.pdf
- ABB. (2020). *ABB Ability™ LEAP para motores y generadores de alta tensión*. ABB.
<https://library.e.abb.com>
- Albornoz Cabello, G. A. (2021). *Aplicación del aprendizaje automático supervisado en el mantenimiento predictivo de los motores eléctricos de inducción en las empresas mineras del Perú* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional del Centro del Perú]. Universidad Nacional del Centro del Perú.
<https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/7567>
- Algar Parrilla, J. A. (2015). *Estudio de la onda de choque normalizada aplicada a diferentes equipos inductivos* (Trabajo Fin de Grado). Universidad Carlos III de Madrid, Departamento de Ingeniería Eléctrica. <https://e-archivo.uc3m.es/rest/api/core/bitstreams/9bc6f032-a1ae-411b-8d13-5f8727173a0b/content>
- Álvarez Salas, J. A., Villalobos Pina, F. J., González García, M. A., Álvarez Salas, R., Morones Alba, J. A., & Rodríguez Cobos, A. (2023). Desarrollo de un banco de pruebas para el diagnóstico de fallas en el estator de un generador síncrono de imanes permanentes. *Pistas Educativas*, 45(145), 259-275.
<https://pistaseducativas.celaya.tecnm.mx/index.php/pistas/article/view/3429>
- Badarudin, R., Hariyanto, D., Ali, M., & Meunmany, S. (2021). *Electric Machines Virtual Laboratory: Testing of DC Motor*. *Journal of Physics: Conference Series*, 2111(1).
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2111/1/012041>
- Bernaola Gaspar, L. A. (2022). *Configuración y regulación de relé de protección para arrancador síncrono en planta de procesos* [Tesis de suficiencia profesional,

https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/11348/1/IV_FIN_1_09_TSP_Bernaola_Gaspar_2022.pdf

Bianchini, C., Bianchi, N., Sala, G., Giannotta, N., & Torreggiani, A. (2024). *Design comparison of surface-mounted permanent magnet synchronous motors with inner and outer rotor configurations. International Journal of Power Electronics and Drive Systems*. DOI: 10.1109/ICEM60801.2024.10700314

Bochita Bolete, G. (2023). *Diseño de una serie de motores asíncronos con eficiencia mejorada (IE3) para aplicaciones de alta temperatura (motores antiincendios)* [Trabajo de Fin de Grado, Universidad Politécnica de Cataluña].
<https://upcommons.upc.edu/handle/2117/403609>

Bong, U., An, S., Voccio, J., Kim, J., Lee, J. T., & Lee, J. (2019). A design study on 40 MW synchronous motor with no-insulation HTS field winding. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 29(5), 1–5.
<https://doi.org/10.1109/TASC.2019.2908548>

Callupe Chávez, J. O., Suárez Oliveros, J. D., & Villar Ramírez, E. A. (2021). *Caracterización de parámetros electromecánicos para determinar las fallas en generadores síncronos trifásicos con rectificador incorporado, Callao 2021* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Callao].
https://repositorio.unac.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12952/6004/TESIS_PR_EGRADO_SUAREZ_CALLUPE_VILLAR_FIEE_2021.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Canchumani, M. D. (2022). *Esquema de comportamiento de motor síncrono en fallas y soluciones en el mantenimiento predictivo en la industria minera* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería].
<https://repositorio.uni.edu.pe/handle/20.500.14076/25824>

- Carbajal Veli, J. (2024). *Evaluación de fallas en motores de molinos de bolas en la minería* [Tesis de licenciatura, Universidad Continental]. Repositorio Institucional de la Universidad Continental. https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/15446/1/IV_FIN_109_TE_Carbajal_Veli_2024.pdf
- Castañeda Ponce de León, AA (2023). *Diseño de un equipo de detección de fallas en aislamiento de rotores de motores síncronos a través de la prueba oscilograma de pico repetitivo* [Tesis de licenciatura, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio Académico PUCP. <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio//handle/20.500.12404/26490>
- Castillo, A. (2018). *Aplicación, análisis y diagnóstico del monitoreo en línea de descargas parciales en el aislamiento de motores anillo de gran potencia (24.0 MW / 16.0 MW) que accionan molinos – Gearless Mill Drive GMD*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Agustín]. https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UNSA_65d23011992d83e43a2037258f13795d
- Castro Heredia, L. C. (2014). *Diagnóstico del aislamiento principal de bobinas estáticas sometidas a esfuerzos termoeléctricos en laboratorio* [Tesis doctoral Universidad del Valle]. <https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/server/api/core/bitstreams/c32598dd-8f18-4497-8670-c056d07f620c/content>
- Chai, F., Gao, L., Yu, Y., & Liu, Y. (2019). *Fault-tolerant Control of Modular Permanent Magnet Synchronous Motor under Open-Circuit Faults*. *IEEE Access*, 7, 154008–154017. DOI: [10.1109/ACCESS.2019.2948363](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2948363)

- Chapman, SJ (2012). *Máquinas eléctricas* (5ta ed.). McGraw-Hill Interamericana.
https://frrq.cvg.utn.edu.ar/pluginfile.php/20762/mod_resource/content/1/Maquinas-electricas-Chapman-5ta-edicion-pdf.pdf
- Chocanapi Aldano, D. M. (2019). *Implementación de un plan de mantenimiento para motores de media tensión en la industria cementera* [Tesis de grado, Universidad Mayor de San Andrés]. <https://repositorio.umsa.bo/handle/123456789/32639>
- Elosegui Capellán, A. (2021). *Diseño de un motor síncrono de imanes permanentes para la propulsión de aviones regionales* [Tesis de grado, Universidad de Navarra]. https://dadun.unav.edu/bitstream/10171/61093/1/Elosegui%2c%20Ane%20905197_Tl.pdf
- Espinoza Quispe, J. C. (2021). *Implementación de un sistema de control de campo para arranque de un motor síncrono de 4000 HP* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional del Centro del Perú]. https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/6828/T010_42290165_T.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Faria, G., Peres, M. F., Silva Neto, O. M. da, Schuertz, J. R., dos Santos, E. L., & da Silva, C. A. G. (2020). A workbench for testing and simulation faults in three-phase electric motors with intelligent electronic device and microcontrolled system. *arXiv preprint arXiv:2011.10910*. <https://arxiv.org/abs/2011.10910>
- García Urbieto, J. (2024). *Digital Twins for the Thermal Analysis of Permanent Magnet Synchronous Motors* [Tesis doctoral, Universidade da Coruña]. <https://ruc.udc.es/dspace/handle/2183/38705>
- Guerrero Meza, D. P. (2019). *Metodología adecuada para medir el aislamiento del devanado del estator en las unidades generadoras del Complejo Hidroenergético Mantaro* [Tesis de licenciatura, Universidad Continental]. <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/7093>

- Hernández, S. R, Fernández, C. C, y Baptista, L, M. (2018). *Metodología de la investigación* (6° ed.). México: McGraw Hill Interamericana Editores S.A. de C.V. http://www.biblioteca.cij.gob.mx/archivos/materiales_de_consulta/drogas_de_abuso/articulos/sampierilasrutas.pdf
- Herrera Salas, J. D. (2019). *Elaboración de un plan de mantenimiento correctivo programado de motores eléctricos síncronos de 1250 HP para la empresa Minera-Metalúrgica Shougang Hierro Perú S.A., 2018* [Tesis de pregrado, Universidad Tecnológica del Perú]. https://repositorio.utp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12867/2448/Jose%20Herrera_Tesis_Titulo%20Profesional_2019.pdf?sequence=4&isAllowed=y
- Hofer, M., Nikowitz, M., & Schrödl, M. (2019). *Análisis comparativo de polos salientes y rotor de barrera de flujo para máquinas de reluctancia síncrona, incluido el rango de debilitamiento del flujo*. *Journal of Engineering*, 2019(17), 4055–4059. <https://doi.org/10.1049/joe.2018.8210>
- Höpner, V. N., & Wilhelm, V. E. (2021). *Insulation Life Span of Low-Voltage Electric Motors—A Survey*. *Energies*. <https://doi.org/10.3390/en14061738>
- Hualpa Molina, J. R. (2018). *Aplicación de ensayos off line para el diagnóstico del estado del aislamiento en máquinas eléctricas rotativas a nivel industrial* [Trabajo de fin de máster, Universitat Politècnica de València]. Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño, Universitat Politècnica de València. <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/113486/HUALPA%20JOHANA-%20APLICACI%C3%93N%20ENSAYOS%20OFF%20LINE.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- Ibrahim, M. N., & Sergeant, P. (2022). *Electrical Machines Winding Technology: Latest Advancements for Transportation Electrification*. *Machines*, 10(7), 563.

[https://doi.org/10.3390/machines10070563​:contentReference\[oaicite:0\]{index=0}](https://doi.org/10.3390/machines10070563​:contentReference[oaicite:0]{index=0}).

Khowja, M. R., Vakil, G., Sengupta, G., Gerada, C., Ramanathan, R., & Benarous, M. (2024). *Thermal life prediction of high-temperature polyimide and PEEK insulated wires for use in low voltage electric motors*. En *2024 Energy Conversion Congress & Expo Europe (ECCE Europe)* (pp. 1–5). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ECCEEurope62508.2024.10752015>

León Ledesma, M. C., Arellano Flores, G., & Correa Betanzo, J. (2015). Motores de corriente alterna síncronos y corriente directa. *Pistas Educativas*, Año XXXV (111), 28–41. Instituto Tecnológico de Celaya. <https://core.ac.uk/download/229040264.pdf>

Madiouni, I. T. (2024). *Comprobaciones y ensayos estáticos recomendados durante el proceso de aceptación de motores eléctricos*. [Trabajo de Fin de Máster, Universitat Politècnica de València]. <file:///C:/Users/Mar%C3%ADa/Downloads/Madiouni%20-%20Comprobaciones%20y%20ensayos%20estaticos%20recomendados%20durante%20el%20proceso%20de%20aceptacion%20de%20mo....pdf>

Martínez, F., & Andrada, P. (2017). Generadores síncronos de alta velocidad. Una evaluación crítica. *Información Tecnológica*, 28(2), 47-58. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642017000200006>

Mercado, Verena, & Peña, José bernardo. (2016). Modelo de gestión del mantenimiento enfocado a la eficiencia y optimización de la energía eléctrica. *Conocimiento*, 28 (1), 99-105. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1315-01622016000100010&lng=es&tlng=es

- Mollisaca Centellas, J. C. (2020). *Mantenimiento y reparación de motores eléctricos síncronos* [Tesis de maestría Universitat Politècnica de València].
<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/153318/Mollisaca%20-%20MANTENIMIENTO%20Y%20REPARACI%c3%93N%20DE%20MOTORES%20EL%c3%89CTRICOS%20S%c3%8dNCRONOS.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Morote Collado, P. R. (2019). *Análisis de armónicos generados por el accionamiento con cicloconvertidor de 12 pulsos en molinos gearless - motor síncrono de 20 MW*. [Tesis de licenciatura, Universidad Católica de Santa María]. Repositorio Institucional UCSM.
https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UCSM_d241bbc4170fcd84b23637e5cad31f90/Details
- Murillo-Soto, LD, Calderon-Arce, C., & Figueroa-Mata, G. (2018). Detección de fallas en motores eléctricos basada en índices de potencias y redes neuronales. *Tecnología en Marcha*, 31 (1), 81-97. <https://doi.org/10.18845/tm.v31i1.3499>
- Oslínger-Gutiérrez, J. L., Tudela-Rangel, O. R., & Caranguay-Mainguez, J. I. (2024). Desing methodology of roebel stator bars for salients poles synchronous generators. *Ingeniería y Competitividad*, 26(2), e-20513320. <https://doi.org/10.25100/iyc.v26i2.13320>
- Pérez Fiallos, JF, Arguello, EE, & Moreno Pallares, RR (2021). Análisis de productividad en rodamientos de alto desempeño hidrostático para máquinas rotativas y turbinas hidráulicas. *Polo del Conocimiento*, 6 (9), 674-686. <https://doi.org/10.23857/pc.v6i9>
- Pinheiro, V. M., Neves, B. L., Oliveira, C. A., Beletti, M. A., & Gomes, L. C. (2022). *Desenvolvimento e implementação de uma bancada experimental para estudo*

da máquina de indução trifásica de rotor bobinado. Revista Científica da UMC, 7(3), 1-14. <https://revista.umc.br/index.php/revistaumc/article/view/1534>

Portal Montero, LR (2021). *Desmontaje, montaje, verificación de un rotor de un motor eléctrico y accesorios* (Trabajo de Fin de Grado). Universidad de La Laguna, Santa Cruz de Tenerife. <https://riull.uull.es/xmlui/bitstream/handle/915/25365/DESMONTAJE%2c%20MONTAJE%2c%20VERIFICACION%20DE%20UN%20ROTOR%20DE%20UN%20MOTOR%20ELECTRICO%20Y%20ACCESORIOS.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Predictiva21, (2021). Eje. <https://predictiva21.com/2-2-eje/#:~:text=El%20eje%20es%20el%20componente,elemento%20accionador%20a%20la%20bomba.>

Quispe Mendoza, E. (2021). Implementación de un módulo electrónico relé de sincronización en tablero eléctrico para mejorar el sistema de arranque de motor síncrono en la empresa Mixercon S.A-2020 (Trabajo de suficiencia profesional). Facultad de Ingeniería, Carrera de Ingeniería Electrónica, Instituto Superior. Lima, Perú. https://repositorio.utp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12867/5616/E.Quispe_Trabajo_de_Suficiencia_Profesional_Titulo_Profesional_2021.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Rojas González, M. (2010). *Reparación de molino SAG en Escondida*. Empresa MRG. <https://empresamrg.blogspot.com/2010/11/reparacion-de-molino-sag-en-escondida.html>

S&P, (2024). ¿Qué es un motor trifásico? Características, tipologías y aplicaciones. <https://www.solerpalau.com/es-es/blog/motor-trifasico/>

Saico Fernández, J. N. (2023). *Aplicación del motor síncrono en molinos gearless*. [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco]. <https://repositorio.unsaac.edu.pe/handle/20.500.12918/7911>

Sancho Blázquez, Á. (s.f.). *Monitorización continua de descargas parciales para caracterización de sistemas de aislamiento en máquinas eléctricas* [Proyecto Fin de Carrera, Universidad Carlos III de Madrid]. Departamento de Ingeniería Eléctrica. <https://e-archivo.uc3m.es/rest/api/core/bitstreams/3893bf85-5506-4ba0-86fb-6f012f729336/content>

Stone, G. C., Boulter, E. A., Culbert, I., & Dhirani, H. (2004). *Electrical insulation for rotating machines: Design, evaluation, aging, testing, and repair*. IEEE Press. <https://doi.org/ISBN 0-471-44506-1>

Sun, S., An, Q., & Lie, X. (2022). *Treatment Strategy Research on a Squirrel-Cage Induction Motor with Broken Rotor Bar Faults*. *Sensors*, 22(12), 4345. <https://doi.org/10.3390/s22124345>.

Tecnología para la Industria. (2021). *Fallas por aislamiento en motores eléctricos*. Tecnología para la Industria. <https://tecnologiaparalaindustria.com/fallas-por-aislamiento-en-motores-electricos-como-medirlo-y-solucionarlo/>

Torres Medina, R., Maldonado Ruelas, V. A., & Ortiz Medina, R. A. (2019). *Revisión de los métodos de detección de fallas en motores síncronos de imanes permanentes con aplicaciones para industria 4.0*. *Pistas Educativas*, (134), 716-731. <https://pistaseducativas.celaya.tecnm.mx/index.php/pistas/article/view/2076/165>

8

Trujillo Fernández, R. E. (2023). *Mantenimiento predictivo de motores eléctricos* [Tesis de grado, Universidad Mayor de San Andrés]. <https://repositorio.umsa.bo/handle/123456789/34921>

- Vega Cortés, N. L. (2019). *Análisis del funcionamiento de un cicloconvertidor Siemens aplicado a un sistema de accionamiento doble piñón corona de un molino SAG*. [Informe final para optar al título de Ingeniero Civil Eléctrico]. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. http://opac.pucv.cl/pucv_txt/txt-9000/UCC9380_01.pdf
- WEG. (s.f.). *Specification of Electric Motors*. WEG. <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/hf9/hcf/WEG-WMO-motores-electricos-guia-de-especificacion-50039910-brochure-spanish-web.pdf>
- Zapana Mamani, L. A. (2019). *Diseño e implementación de un módulo didáctico para el arranque electrónico de motores eléctricos de inducción por controlador lógico programable (PLC)* [Tesis de licenciatura, Universidad Católica de Santa María]. <https://repositorio.ucsm.edu.pe/items/ca5db843-d365-4e52-ae63-d243374cdd85>
- Zou, Z., Liu, S., & Kang, J. (2024). *Degradation Mechanism and Online Electrical Monitoring Techniques of Stator Winding Insulation in Inverter-Fed Machines: A Review*. World Electr. Veh. J. <https://doi.org/10.3390/wevj15100444>

Anexos

Anexo A: Matriz de Consistencia

TÍTULO: “METODOLOGÍA DE MODIFICACIÓN DEL NEUTRO DEL ESTATOR PARA INCREMENTAR LA VIDA ÚTIL DEL AISLAMIENTO DE MOTORES ELÉCTRICOS SÍNCRONOS DE GRAN POTENCIA”				
Problemas	Objetivos	Hipótesis	Variables	Metodología
<p><u>Problema general</u> ¿De qué manera la metodología de modificación del neutro del estator incrementa la vida útil del aislamiento de motores eléctricos síncronos de gran potencia?</p>	<p><u>Objetivo General</u> Determinar de qué manera la metodología de modificación del neutro del estator incrementa la vida útil del aislamiento de motores eléctricos síncronos de gran potencia.</p>	<p><u>Hipótesis general</u> La modificación del neutro del estator incrementará la vida útil del aislamiento de motores eléctricos síncronos de gran potencia.</p>	<p><u>Variable dependiente:</u> Vida útil del aislamiento de motores eléctricos síncronos</p> <p><u>Variable independiente:</u> Modificación del neutro del estator.</p>	<p><u>Tipo de investigación:</u> Aplicada</p> <p><u>Nivel de investigación:</u> Explicativo</p> <p><u>Método:</u> Cuantitativo</p> <p><u>Diseño:</u> Experimental</p>
<p><u>Problemas específicos:</u> ¿De qué manera la inversión del neutro del estator contribuye a incrementar la vida útil del aislamiento de motores eléctricos síncronos de gran potencia? ¿De qué manera la modificación del neutro del estator contribuye a incrementar la vida útil del aislamiento de motores eléctricos síncronos de gran potencia?</p>	<p><u>Objetivos específicos:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Determinar de qué manera la inversión del neutro del estator contribuye a incrementar la vida útil del aislamiento de motores eléctricos síncronos de gran potencia. ✓ Determinar de qué manera la modificación del neutro del estator contribuye a incrementar la vida útil del del aislamiento de motores eléctricos síncronos de gran potencia. 	<p><u>Hipótesis específicas:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ La inversión del neutro del estator incrementará la vida útil del aislamiento de motores eléctricos síncronos de gran potencia. ✓ La modificación del neutro del estator incrementará la vida útil del aislamiento de motores eléctricos síncronos de gran potencia. 		<p><u>Población y muestra:</u> Cuatro motores eléctricos síncronos.</p> <p><u>Técnicas e instrumentos de recolección de datos:</u> Ficha de recolección de datos</p> <p><u>Técnicas e instrumentos de análisis y procesamiento de datos:</u> Histogramas</p>

Anexo B Operacionalización de variables

Variable	Definición conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores
Variable dependiente: Vida útil del aislamiento de motores eléctricos síncronos	La vida útil del aislamiento en el bobinado de motores eléctricos se refiere al tiempo durante el cual el aislamiento puede resistir las tensiones eléctricas, térmicas y ambientales antes de degradarse, lo que puede conducir a fallas en el motor (ABB, 2020).	Se mide mediante pruebas como el análisis de corrientes de polarización-despolarización (PDCA) o pruebas de descargas parciales, que permiten monitorear el estado del aislamiento y predecir el tiempo de vida útil restante (ABB, 2020).	Durabilidad del Aislamiento	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Horas de operación sin fallas de los motores eléctricos síncronos. ✓ Disponibilidad de los molinos accionados por motores eléctricos síncronos
Variable independiente: Modificación del neutro del estator.	La modificación del neutro del estator implica cambios en la configuración eléctrica del neutro, lo que puede mejorar la distribución de tensiones y reducir los efectos negativos sobre el aislamiento del motor (Tecnología para la Industria, 2021).	Se puede evaluar ajustando la configuración del neutro en pruebas periódicas observando la mejora en la eficiencia del motor y el impacto en la reducción de tensiones sobre el aislamiento del bobinado (Tecnología para la Industria, 2021).	Inversión del Neutro	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Tiempo de planificación para la inversión del neutro. ✓ Horas de ejecución para la inversión del neutro.
			Modificación del Neutro	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Tiempo de planificación para la modificación del neutro. ✓ Horas de ejecución para la modificación del neutro.