

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas
Carrera de Electricidad



**ANÁLISIS DE LAS CARACTERÍSTICAS DE
FUNCIONAMIENTO DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN DE
JAULA DE ARDILLA CON BARRAS DE COBRE**

Trabajo de grado previo a la obtención del título de Ingeniero Eléctrico

Autor:

Emerson Rivaldo Quilca Molina

Director:

Ing. Jhonny Javier Barzola Iza MSc.

IBARRA 2024



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

DIRECCIÓN DE BIBLIOTECA

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1004610174		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Quilca Molina Emerson Rivaldo		
DIRECCIÓN:	La Esperanza, Galo Plaza Lasso y vía Paniquindra		
EMAIL:	erquilcam@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:		TELÉFONO MÓVIL:	0991307357

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	"ANÁLISIS DE LAS CARACTERÍSTICAS DE FUNCIONAMIENTO DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN DE JAULA DE ARDILLA CON BARRAS DE COBRE"
AUTOR (ES):	Quilca Molina Emerson Rivaldo
FECHA: DD/MM/AAAA	13/06/2024
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> GRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero Eléctrico
ASESOR /DIRECTOR:	Ing. Jhonny Barzola MSc.

2. CONSTANCIAS

El autor (es) manifiesta (n) que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es (son) el (los) titular (es) de los derechos patrimoniales, por lo que asume (n) la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá (n) en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 13 días del mes de junio de 2024

EL AUTOR:

Nombre: Emerson Rivaldo Quilca Molina



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CERTIFICACIÓN DE DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

Yo, Jhonny Javier Barzola Iza en calidad de tutor del señor estudiante Quilca Molina Emerson Rivaldo, certifico que ha culminado con las normas establecidas en la elaboración del trabajo de investigación titulado **“ANÁLISIS DE LAS CARACTERÍSTICAS DE FUNCIONAMIENTO DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN DE JAULA DE ARDILLA CON BARRAS DE COBRE”**.

Para la obtención del título de Ingeniero Eléctrico aprobando la defensa, impresión y empastado.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Jhonny Barzola", is written over a horizontal dotted line.

Ing. Jhonny Javier Barzola Iza MSc.

DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

DEDICATORIA

De manera especial, a Dios, quien ha sido el pilar fundamental de cada uno de mis logros y me ha colmado de conocimiento y sabiduría necesaria para alcanzar esta meta.

A mis padres, por su amor incondicional, su guía y su apoyo constante en cada etapa de mi vida. Su ejemplo de esfuerzo y dedicación ha sido la base sobre la cual he construido y alcanzado cada uno de mis sueños. No hay manera de agradecer todo lo que han hecho por mí. Gracias por ser los mejores padres.

A mis hermanos, por su constante ánimo y por creer siempre en mí, incluso en los momentos más difíciles. Su confianza, su ayuda y ejemplo han sido una fuente de inspiración constante.

A mi hija y a su madre, por su amor, compañía y apoyo incondicional. Ustedes son mi mayor inspiración y fortaleza, las razones por las que me esfuerzo cada día. A mi querida hija, tu presencia en mi vida me ha brindado una motivación sin igual y un propósito claro para seguir adelante. Estefany, gracias por estar a mi lado en todo momento, por tu comprensión y por ser un pilar fundamental en mi vida. Sin su amor y apoyo, este logro no habría sido posible. Ustedes representan la luz que guía mi camino y la energía que impulsa mis sueños.

A mis amigos Ricardo, Sebastián, Ahuqui y Tatiana, quienes siempre han estado presentes con su apoyo y palabras de aliento. Su invaluable amistad ha sido fundamental durante todo este trayecto.

A mi primo, Milton por ser un gran amigo y compañero, por tu apoyo y confianza. Gracias por la motivación y la alegría que me contagias en todo momento.

A todos ustedes y a cada persona que siempre confió en mí, es un privilegio contar con su apoyo.

Emerson Quilca

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradezco a Dios por otorgarme la salud, la fortaleza y la sabiduría necesarias para completar esta etapa tan significativa en mi vida. Sin Su guía y bendición, este logro no habría sido posible. Agradezco también por brindarme una gran familia y amigos que me han apoyado y ayudado a edificar mi vida de la manera correcta.

Expreso mi más sincero agradecimiento a mi tutor, MSc. Jhonny Barzola por su invaluable orientación, paciencia y apoyo constante durante todo el proceso. Su conocimiento y experiencia han sido fundamentales para el desarrollo de este trabajo.

También agradecer a mi asesora, MSc. Isabel Quinde por sus valiosas contribuciones, sugerencias y críticas constructivas que enriquecieron significativamente este proyecto. Su dedicación, tiempo y compromiso fueron esenciales para alcanzar los objetivos planteados.

A los docentes de la Carrera de Electricidad, les extiendo mi más profundo agradecimiento. Cada uno de ustedes ha dejado una huella imborrable en mi formación académica y profesional. Sus enseñanzas y el conocimiento compartido han sido pilares fundamentales en mi educación.

Finalmente, a la “Universidad Técnica del Norte” le agradezco por brindarme la oportunidad de crecer tanto personal como profesionalmente. Gracias a los recursos y el entorno académico proporcionado, he podido desarrollar habilidades y conocimientos que me acompañarán en mi vida profesional.

Emerson Quilca

ÍNDICE DE CONTENIDOS

IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA.....	II
CONSTANCIA.....	II
ACEPTACIÓN DEL DIRECTOR.....	III
DEDICATORIA.....	IV
AGRADECIMIENTO	V
RESUMEN	XV
ABSTRACT.....	XVI
CAPÍTULO I	1
INTRODUCCIÓN	1
Planteamiento del problema.....	1
Formulación del problema	2
Objetivos.....	2
Objetivo General.....	2
Objetivos Específicos.....	2
Alcance del proyecto.....	2
Justificación	3
CAPÍTULO II.....	5
Marco Teórico.....	5
2.1 Contextualización	5
2.2 El motor de inducción.....	7
2.2.1 Estructura del motor de inducción jaula de ardilla	7
2.2.1.1 Estator.....	8

2.2.1.2 Rotor	8
2.2.2 Principio de funcionamiento del motor de inducción jaula de ardilla	9
2.2.3 Circuito equivalente del motor de inducción	10
2.3 Características del motor de inducción jaula de ardilla	10
2.3.1 Comportamiento de un motor de inducción jaula de ardilla.....	11
2.3.1.1 Relación potencia par de un motor de inducción	11
2.3.1.2 Relación par-velocidad de un motor de inducción	12
2.3.2 Clases de diseño.....	13
2.3.3 Tipos de rotores jaula de ardilla	15
2.3.4 Aislamiento de los rotores jaula de ardilla.....	15
2.3.5 Aplicaciones del motor de inducción jaula de ardilla	16
2.3.6 Materiales utilizados en el rotor de inducción jaula de ardilla	16
2.4 El motor de inducción jaula de ardilla con barras de cobre.....	17
2.4.1 Características del motor de inducción jaula de ardilla con barras de cobre	18
2.4.1.1 Ventajas y desventajas de la sustitución de las barras de aluminio por cobre en un motor de inducción jaula de ardilla.....	18
2.4.2 Análisis comparativo de las características de los materiales utilizados en el rotor jaula de ardilla (Aluminio - Cobre).....	19
2.5 Métodos de aplicación de barras de cobre en motores de inducción jaula de ardilla	20
2.5.1 Aplicaciones del motor de inducción jaula de ardilla con barras de cobre	21
CAPÍTULO III.....	22
Marco metodológico	22
3.1 Descripción del lugar	22

3.2 Metodología	22
3.3 Procedimiento	24
3.4 Materiales utilizados para el estudio e implementación del motor jaula de ardilla con barras de cobre.....	26
3.4.1 Programas computacionales.....	27
3.4.1.1 FEMM	27
3.4.1.2 Matlab	28
3.4.1.3 Simulink.....	28
3.4.2 Equipos	28
3.4.2.1 Kit de horno eléctrico de fusión de metales	29
3.4.2.2 Motor trifásico jaula de ardilla	29
3.4.2.3 Pinza de potencia.....	30
3.4.2.4 Medidor de resistencia de aislamiento.....	31
3.4.2.5 Fuente de alimentación digital de corriente continua (CC).....	32
3.4.2.6 Auto Transformador de corriente alterna (CA).....	32
3.4.3 Análisis experimental del motor de inducción jaula de ardilla	33
3.4.3.1 Prueba en vacío.....	33
3.4.3.2 Prueba de corriente directa (DC).....	34
3.4.3.3 Prueba de rotor bloqueado.....	34
3.4.4 Ecuaciones matemáticas utilizadas para el estudio de la MI.....	35
3.4.4.1 Deslizamiento de la máquina de inducción	35

3.4.4.2 Frecuencia eléctrica del rotor	35
3.4.4.4 Parámetros de modelo del circuito equivalente de la MI	36
3.4.4.5 Equivalentes de Thévenin.....	39
3.4.4.6 Numero de vueltas del bobinado del estator.....	41
3.4.5 Clases de diseño y normativas	42
CAPÍTULO IV.....	43
Resultados y discusión.....	43
4.1 Implementación del prototipo de la MI de jaula de ardilla con barras de cobre.....	43
4.2 Pruebas de funcionamiento de la MI convencional y el prototipo.....	53
4.2.1 Resultados de las pruebas de funcionamiento de la MI convencional.....	53
4.2.2 Resultados de las pruebas de funcionamiento del prototipo	54
4.2.3 Deslizamiento y frecuencia del rotor de la MI convencional y el prototipo.....	58
4.2.4 Calculo de los parámetros del circuito equivalente de la MI convencional	59
4.2.5 Calculo de los parámetros del circuito equivalente del prototipo.....	62
4.2.6 Curva par velocidad de la MI convencional y el prototipo.....	65
4.3 Simulaciones electromagnéticas mediante FEMM.....	70
4.3.1 Incorporación de los materiales	73
4.3.2 Resultados de la simulación en FEMM	75
4.3.2.1 Motor de inducción jaula de ardilla con barras de aluminio	77
4.3.2.2 Motor de inducción jaula de ardilla con barras de cobre.....	79
4.4 Análisis de la MI convencional en Simulink	83
4.4.1 Análisis del prototipo de MI	86

4.5 Discusión.....	90
Conclusiones.....	93
Recomendaciones	94
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	95
ANEXOS	102
Anexo A	102
Anexo B	105
Anexo C	106
Anexo D.....	106
Anexo E	107
Anexo F.....	108

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estator y rotor de un motor de inducción trifásico jaula de ardilla.	7
Figura 2. Esquema de un rotor jaula de ardilla.	9
Figura 3. Circuito equivalente por fase de un motor de inducción	10
Figura 4. Diagrama de flujo de potencia de un motor de inducción.....	11
Figura 5. Curva característica par-velocidad de los motores de inducción	12
Figura 6. Clases de diseño y curvas par-velocidad del rotor jaula de ardilla	14
Figura 7. Diagrama de bloques descriptivo de las actividades realizadas	24
Figura 8. Datos de placa del motor de inducción trifásico estudiado.	30
Figura 9. Esquema de conexión para efectuar la prueba de vacío.	34
Figura 10. Esquema de conexión para efectuar la prueba de corriente continua	34
Figura 11. Esquema de conexión para efectuar la prueba de rotor bloqueado	35
Figura 12. Circuito equivalente resultante simplificado de un motor de inducción	39
Figura 13. Desmontaje del motor trifásico jaula de ardilla.....	44
Figura 14. Retiro de los anillos de cortocircuito del rotor	44
Figura 15. Ranuras de las barras conductoras del rotor.	45
Figura 16. Barras de cobre del rotor jaula de ardilla	46
Figura 17. Moldes de los anillos de cortocircuito.....	46
Figura 18. Deshilachado y colocación del cobre en el crisol.....	47
Figura 19. Ajuste de temperatura en el horno fundidor	47
Figura 20. Preparación de los moldes	48
Figura 21. Fundición del primer anillo de cortocircuito	48
Figura 22. Resultado del primer anillo de cortocircuito	49

Figura 23. Fundición del segundo anillo de cortocircuito	49
Figura 24. Resultado obtenido de la fundición del cobre en el rotor	50
Figura 25. Pulido del cobre en el rotor jaula de ardilla.....	50
Figura 26. Barnizado del rotor jaula de ardilla	51
Figura 27. Colocación de los rodamientos y el ventilador de la MI.....	51
Figura 28. Ensamblado del motor de inducción jaula de ardilla con barras de cobre	52
Figura 29. Pruebas de funcionamiento de la MI convencional.....	53
Figura 30. Pruebas de funcionamiento del prototipo.....	55
Figura 31. Prueba de aislamiento del bobinado del estator respecto a tierra.....	57
Figura 32. Prueba DAR del prototipo	58
Figura 33. Circuito equivalente de la MI convencional.....	62
Figura 34. Circuito equivalente del prototipo en base a los valores nominales de la MI	64
Figura 35. Circuito equivalente del prototipo con variables corregidas	65
Figura 36. Curva par velocidad de la MI convencional.....	66
Figura 37. Curva par velocidad del prototipo en base a las variables eléctricas iniciales	68
Figura 38. Curva par velocidad del prototipo corregida.....	69
Figura 39. Diagrama esquematizado de la MI en AutoCAD.....	71
Figura 40. Diseño de la MI en FEMM.....	72
Figura 41. Características del problema en FEMM.....	72
Figura 42. Distribución de los materiales a la MI convencional	74
Figura 43. Límite del contorno para la simulación en FEMM.	75
Figura 44. Compilación de malla eléctrica de la MI convencional y el prototipo.....	75
Figura 45. División del circuito del estator y rotor en 4 polos	76

Figura 46. Densidad de flujo magnético de la MI convencional	77
Figura 47. Curva de densidad del flujo magnético de la MI convencional	78
Figura 48. Densidad de corriente eléctrica de la MI convencional	78
Figura 49. Densidad del flujo magnético del prototipo	79
Figura 50. Curva de densidad de flujo magnético del prototipo.....	80
Figura 51. Densidad de corriente eléctrica del prototipo.....	81
Figura 52. Densidad de flujo magnético del prototipo tras ajustar variables eléctricas	81
Figura 53. Curva de flujo magnético del prototipo tras ajustar variables eléctricas.....	82
Figura 54. Magnitud de la densidad del flujo del prototipo.....	83
Figura 55. Diagrama de bloques en Simulink.....	84
Figura 56. Corriente de la MI convencional	85
Figura 57. Torque del motor de inducción convencional	85
Figura 58. Velocidad del motor de inducción con respecto al tiempo	86
Figura 59. Corriente del prototipo en base a las variables nominales	87
Figura 60. Torque del prototipo	88
Figura 61. Velocidad del prototipo con respecto al tiempo	88
Figura 62. Corriente del prototipo en base a la corrección de las variables de entrada.....	89
Figura 63. Torque del prototipo en base a la corrección de las variables de entrada.....	89

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Características del horno eléctrico digital fundidor de metales ToAuto .	29
Tabla 2	Características de la pinza de potencia Amprobe ACD-45PQ .	30
Tabla 3	Características del Medidor de resistencia de aislamiento Fluke 1507 .	31
Tabla 4	Características de la fuente de alimentación de CC .	32
Tabla 5	Características del autotransformador de CA.....	32
Tabla 6	Resultados de las pruebas de funcionamiento de la MI convencional	54
Tabla 7	Resultados de las pruebas de funcionamiento del prototipo	55
Tabla 8	Resultados del prototipo con variables eléctricas de entrada corregidas	56
Tabla 9	Prueba de resistencia entre bobinas del estator del prototipo.....	57
Tabla 10	Parámetros del circuito equivalente de la MI convencional	61
Tabla 11	Parámetros del circuito equivalente del prototipo según valores nominales.....	64
Tabla 12	Equivalentes de Thévenin de la MI convencional.....	65
Tabla 13	Parámetros de la curva par velocidad de la MI convencional.....	66
Tabla 14	Equivalentes de Thévenin del prototipo según variables nominales.....	67
Tabla 15	Parámetros curva par velocidad del prototipo con variables nominales	67
Tabla 16	Equivalentes de Thévenin del prototipo con la corrección de las variables.....	68
Tabla 17	Parámetros corregidos de la curva par velocidad del prototipo	69
Tabla 18	Parámetros de la MI para la simulación en FEMM	70
Tabla 19	Parámetros de la MI para la simulación en Simulink.....	84
Tabla 20	Parámetros del prototipo para la simulación en Simulink.....	87

RESUMEN

Dada la creciente demanda global de energía eléctrica, optimizar el rendimiento de los motores de inducción tipo jaula de ardilla, predominantes en la industria por su robustez y bajo mantenimiento, es crucial. Este estudio propone la sustitución de las barras y anillos de cortocircuito de aluminio por cobre en un motor de inducción trifásico de jaula de ardilla WEG de ½ HP, empleando el método de fundición. El enfoque teórico y experimental del estudio incluye pruebas de rendimiento, análisis de parámetros de circuito equivalente y simulaciones en FEMM y MATLAB. Los resultados indican que el uso del cobre mejora significativamente la potencia y la velocidad del motor, reduciendo la resistencia del rotor y aumentando las inductancias de rotor y estator, lo que altera fundamentalmente las características físicas del motor, disminuyendo el torque de arranque y el deslizamiento máximo. Estos hallazgos demuestran que la sustitución de materiales en el rotor ofrece una ruta viable para aumentar la eficiencia de los motores eléctricos, sugiriendo futuras investigaciones sobre la implementación de materiales alternativos y configuraciones geométricas para optimizar aún más el diseño y rendimiento de estas máquinas.

Palabras clave: Curva característica, Eficiencia eléctrica, Fundición de metales, Motor de inducción trifásico, Rotor jaula de ardilla.

ABSTRACT

Given the growing global demand for electrical energy, optimizing the performance of squirrel cage induction motors, predominant in the industry for their robustness and low maintenance, is crucial. This study proposes the substitution of aluminum bars and short-circuit rings with copper in a WEG ½ HP three-phase squirrel cage induction motor, using the casting method. The study's theoretical and experimental approach includes performance tests, equivalent circuit parameter analysis, and simulations in FEMM and MATLAB. The results indicate that using copper significantly improves the motor's power and speed, reducing rotor resistance and increasing rotor and stator inductances, fundamentally altering the motor's physical characteristics, decreasing startup torque, and maximum slip. These findings demonstrate that substituting materials in the rotor offers a viable route to increase the efficiency of electric motors, suggesting further research on the implementation of alternative materials and geometric configurations to further optimize the design and performance of these machines.

Keywords: Characteristic curve, Electrical efficiency, Metal casting, Three phase induction motor, Squirrel cage rotor.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Tema: Análisis de las características de funcionamiento de un motor de inducción de jaula de ardilla con barras de cobre.

Planteamiento del problema

Los motores de inducción de jaula de ardilla actualmente son ampliamente utilizados dentro de la industria debido a su simplicidad, eficiencia y baja necesidad de mantenimiento. En un motor jula de ardilla, el rotor generalmente se construye a partir de un conjunto de barras conductoras longitudinales de aluminio, un material que tiene algunas limitaciones en términos de conductividad eléctrica y resistencia mecánica. Por lo tanto, el material utilizado en las barras puede influir significativamente en el rendimiento del motor. En este sentido, existen varios materiales altamente eficaces en términos de conductividad, baja resistencia eléctrica y alta resistencia mecánica, como la plata, el oro y el cobre; materiales que pueden llegar a ser muy costosos a excepción del cobre, pero pueden aumentar significativamente la eficiencia de una máquina. Además, estos motores pueden incluir barras de aluminio o cobre en su rotor. Sin embargo, es importante destacar que existe una variación significativa en los precios, siendo más costoso el motor de inducción con barras de cobre debido a sus mayores costos de fabricación, aunque se ve compensado por una mayor eficiencia. Los motores de alta eficiencia generalmente tienden a ser más robustos y mejor contruidos que los motores estándar. El cobre es uno de los materiales más comunes que a comparación del aluminio posee mayor conductividad, por lo que en la actualidad este metal es utilizado en diferentes aplicativos como conductores, bobinas para motores, generadores y transformadores. Sin embargo, uno de los principales contras es que el peso del cobre es significativamente mayor al del aluminio.

Formulación del problema

¿Cómo afecta el uso de barras de cobre en el rotor de un motor de inducción de jaula de ardilla a sus características de funcionamiento en comparación con su estado inicial al utilizar barras de aluminio, y cuál sería la metodología adecuada para llevar a cabo este estudio?

Objetivos

A continuación, se presenta el objetivo general y los objetivos específicos planteados para el presente proyecto.

Objetivo General

Analizar las características de funcionamiento de un motor de inducción jaula de ardilla con barras de cobre para el estudio de sus parámetros técnicos mediante la validación de un prototipo.

Objetivos Específicos

1. Describir las características, elementos y principios fundamentales para el estudio e implementación del motor de inducción jaula de ardilla con barras de cobre.
2. Estudiar el motor de inducción jaula de ardilla con barras de cobre mediante herramientas computacionales.
3. Implementar el motor de inducción jaula de ardilla con barras de cobre.

Alcance del proyecto

El propósito de este proyecto es analizar las características de funcionamiento de un motor de inducción jaula de ardilla que utiliza un metal diferente (cobre en lugar de aluminio) en las barras del rotor jaula de ardilla. Para ello, se llevará a cabo una investigación bibliográfica utilizando diversas fuentes, como artículos científicos, revistas científicas, libros y tesis. Este enfoque permitirá adquirir una comprensión detallada del tema y facilitará el análisis de las diversas modificaciones que pueden realizarse en el rotor de este tipo de motor.

Para este estudio, se utilizará un motor trifásico jaula de ardilla de la marca Weg W22 High Efficiency, con una potencia nominal de (½)HP, tensión nominal de operación de 220V, corriente nominal de operación de 1.87 A, velocidad nominal del rotor entre 1700 y 1725 RPM, factor de potencia de 0.72 y eficiencia del 72.0% (Datos obtenidos de la placa del motor).

Para la simulación, se utilizará programas computacionales como Matlab, en el cual se realizará el modelamiento y análisis de rendimiento y FEMM (Finite Element Method Magnetics) el cual facilitará la obtención de soluciones para la distribución de los campos eléctricos y magnéticos mediante el método de elementos finitos. Esto servirá para validar el funcionamiento y analizar el comportamiento del motor jaula de ardilla con barras de cobre antes de su construcción.

Para la implementación, se procederá a modificar el rotor de un motor jaula de ardilla convencional, mencionado anteriormente. Este proceso implicará la remoción de las barras de aluminio a través de la realización de diversas perforaciones longitudinales en la jaula del rotor. Posteriormente, se empleará el método de fundición para formar las nuevas barras de cobre en el rotor. Finalmente, se realizará las pruebas características y de funcionamiento, con la finalidad de compararlos con las del motor convencional que utiliza barras de aluminio.

Justificación

La creciente demanda de energía a nivel mundial, los incrementos en los costos de la energía eléctrica y las medidas medioambientales han generado la necesidad de mejorar la eficiencia y el rendimiento de todas las máquinas eléctricas que son ampliamente utilizadas en aplicaciones industriales, comerciales y residenciales. Por lo tanto, el estudio sobre motores de inducción más eficientes adquiere gran importancia en la búsqueda de un futuro energético más sostenible y amigable con el medio ambiente.

Los motores de inducción de jaula de ardilla se caracterizan debido a su simplicidad, robustez y bajo costo de mantenimiento. Sin embargo, existe un margen significativo de mejora, especialmente en el material conductor utilizado en las barras del rotor, ya que, en este tipo de motor las variaciones de funcionamiento generalmente durante el arranque provienen principalmente del rotor.

En relación con los precios, los motores de inducción de jaula de ardilla con barras de cobre presentan una variación de aproximadamente un 30% en comparación con los motores que utilizan barras de aluminio. Esta diferencia se debe al costo superior del cobre, el cual se justifica por su mayor conductividad eléctrica y resistencia mecánica. Por lo tanto, el estudio de las características de funcionamiento de un motor de inducción de jaula de ardilla con barras de cobre es factible y relevante. Mediante herramientas computacionales y pruebas de funcionamiento, se evaluará el impacto de sustituir las barras de aluminio por cobre en términos de eficiencia, así como analizar las características de funcionamiento resultantes de la modificación del motor.

El estudio del impacto causado al sustituir las barras de aluminio por cobre en un motor de inducción jaula de ardilla, presenta expectativas en términos económicos y de eficiencia debido a las propiedades del cobre que además podría permitir un mejor rendimiento en términos de potencia, factor de potencia, torque, etc. Este estudio generara conocimientos valiosos para la industria y el desarrollo de motores más eficientes y sostenibles en un futuro.

CAPÍTULO II

Marco Teórico

Este capítulo abordará un estudio bibliográfico sobre los conceptos fundamentales del motor de inducción trifásico con rotor de jaula de ardilla. Se explorarán sus competencias, características, principios de funcionamiento, y aplicaciones. Además, se evaluarán las ventajas y desventajas del uso de cobre y aluminio en las barras del rotor de este tipo de motor, examinando métodos y técnicas disponibles para optimizar estos motores mediante la aplicación de cobre en las barras del rotor.

2.1 Contextualización

Los motores de inducción de jaula de ardilla en los últimos años han tenido un gran impacto siendo ampliamente utilizados dentro del sector industrial, comercial y residencial debido a su simplicidad. En la actualidad el uso de estos motores constituye más del 60% de la energía eléctrica total consumida a nivel mundial y cerca del 90% de estas se debe a los motores de inducción jaula de ardilla [1]. La alta demanda de su uso, la situación actual del consumo energético y el precio de la energía eléctrica son factores que han ocasionado que se trabaje en términos de eficiencia de estas máquinas eléctricas.

Los motores de inducción jaula de ardilla se categorizan de acuerdo con la clase de diseño del laminado que aloja las barras del rotor, así como sus características de deslizamiento y eficiencia. En el diseño clase A las barras son largas y se encuentra colocadas cerca de la superficie, en el diseño clase B las barras del rotor son profundas y largas mientras que el diseño clase C corresponde al rotor de doble jaula el cual se conforma por un conjunto de barras largas ubicadas en la parte profunda del rotor y barras pequeñas colocadas cerca de la superficie, mientras que en el diseño clase D las barras son pequeñas y se encuentran cerca de la superficie [2].

La resistencia del rotor en un motor de inducción jaula de ardilla tiene un impacto significativo en el funcionamiento del motor. Un rotor con alta resistencia genera un alto par de arranque y una baja corriente de arranque, mientras que un rotor de baja resistencia ofrece un bajo deslizamiento y alta eficiencia a plena carga. Los factores que influyen en la resistencia del rotor incluyen el material conductor utilizado en las barras, la temperatura, y el diseño del rotor, que determina la longitud y la sección transversal de las barras conductoras. En este sentido, los diseños de clase A y B presentan una resistencia estándar, mientras que los de clase C y D poseen una resistencia más alta [2].

El rotor del motor de inducción jaula de ardilla se constituye a partir de una serie de barras conductoras de aluminio moldeadas a presión las cuales se encuentran dispuestas entre las ranuras en la cara del rotor y cortocircuitadas en cada extremo por anillos, la baja resistencia del rotor hace que estos motores posean excelentes características para marchas a velocidades constantes [3]. Por lo cual, el material utilizado para la formación de las barras puede afectar considerablemente en la eficiencia del motor.

En comparación del aluminio varios metales tales como el oro, la plata y el cobre presentan mejores desempeños en el ámbito eléctrico, este último posee mejores características de conductividad y resistencia mecánica además de que su precio es accesible en comparación al precio de la plata y el oro, en relación con el cobre, el aluminio presenta un 61% de conductividad al 30% del peso del cobre [4]. Esto implica la disminución de la conductividad eléctrica para lograr una reducción en el peso del conductor en este sentido, la implementación de barras de cobre a un rotor de jaula de ardilla en lugar del aluminio tiene el potencial de incrementar en un gran nivel la eficiencia del motor, es decir, la potencia mecánica de salida podría llegar a ser la misma que un

motor de inducción jaula de ardilla convencional requiriendo una menor potencia eléctrica de entrada [5].

Diversos estudios han demostrado que la sustitución directa del material de la jaula de ardilla del rotor que pasa de aluminio a cobre es una metodología eficaz y no muy costosa para mejorar la eficiencia de un motor, esto se debe a que las pérdidas por efecto joule reducen significativamente ya que el cobre experimenta temperaturas más bajas a comparación del aluminio, además la baja resistividad del cobre también aporta de gran manera a la mejora de la eficiencia ocasionando una menor resistencia nominal del rotor [6].

2.2 El motor de inducción

Funcionando bajo los principios de inducción electromagnética, el motor de inducción, un motor asíncrono, transforma energía eléctrica en energía mecánica. Este motor, se clasifica en base al tipo de rotor que utiliza, siendo los rotores devanados o con anillos rozantes y los rotores de jaula de ardilla o en cortocircuito [2].

2.2.1 Estructura del motor de inducción jaula de ardilla

El diseño del motor de inducción tipo jaula de ardilla comprende dos componentes fundamentales: el estator y el rotor, ilustrados en la siguiente Figura.



Figura 1. Estator y rotor de un motor de inducción trifásico jaula de ardilla [7].

El estator es responsable de generar un campo magnético, mientras que el rotor se encarga de girar y generar el trabajo mecánico [2]. Estos dos componentes trabajan en conjunto para hacer funcionar el motor de inducción.

2.2.1.1 Estator

Consiste en una carcasa metálica de hierro fundido que protege los componentes internos, un núcleo de acero laminado provisto de ranuras y devanados de cobre los cuales se encuentran desfasados 120° entre sí [2].

2.2.1.2 Rotor

El motor de inducción se clasifica según el tipo de rotor, rotor de jaula de ardilla y rotor devanado. Estos rotores tienen la función de girar y generar movimiento. La energía eléctrica se transfiere del estator al rotor mediante campos magnéticos inducidos, lo que provoca un flujo de corriente en el rotor y genera movimiento [3]. Mantilla San José expresa en su trabajo de grado que “el devanado del rotor forma un circuito cerrado a través del cual fluyen corrientes inducidas por el campo magnético” [7].

El rotor bobinado está compuesto por un conjunto de devanados trifásicos, generalmente conectados en estrella (Y) similares a los del estator. Los tres extremos de los conductores de los devanados del rotor están conectados a anillos rozantes instalados en su propio eje [2].

Mientras que, un rotor de jaula de ardilla está formado por barras conductoras sólidas, las cuales actúan como el sistema de conductores del rotor. Estas barras están dispuestas en ranuras en la superficie externa del rotor y están conectadas en cada extremo por anillos de cortocircuito [2]. La

Figura 2 ilustra la disposición de las barras de este tipo de rotor.

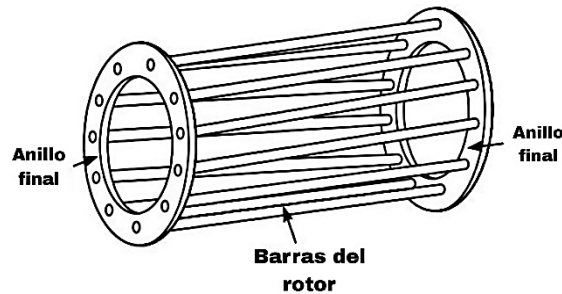


Figura 2. Esquema de un rotor jaula de ardilla [2].

El material, el número de barras, la longitud, la forma y disposición de las barras, así como el ángulo de inclinación y su posición en la superficie del rotor, son factores cruciales que pueden ajustarse según los requerimientos de torque y corriente de arranque [8]. Estos elementos influyen en la resistencia del rotor en un motor de inducción de jaula de ardilla, por lo general, una barra conductora con una mayor área de sección transversal ofrece una menor resistencia [8].

2.2.2 Principio de funcionamiento del motor de inducción jaula de ardilla

El motor de inducción opera como un dispositivo electromagnético que aprovecha la interacción entre dos campos magnéticos; el campo magnético rotativo generado por el estator y el campo magnético inducido en el rotor [2]. Esta interacción permite generar un movimiento rotativo.

Este tipo de motor funciona alimentando el estator con corriente alterna monofásica o trifásica, lo que crea un campo magnético giratorio. Este campo interactúa con los conductores del rotor, generando una fuerza electromotriz y corrientes debido al cortocircuito de las barras del rotor, mismas que generan un segundo campo magnético giratorio. La interacción de ambos campos, el del estator y el inducido en el rotor, produce el par electromagnético el cual orienta la rotación del rotor alineándola con la del campo estático [9]. Es posible invertir la dirección del campo magnético rotatorio intercambiando dos de las tres fases de alimentación del motor.

La estructura del rotor permite la inducción de corrientes, generando un par motor adicional que incrementa la fuerza de giro, es importante destacar que, en este tipo de motor, el rotor no está eléctricamente conectado al estator, lo que elimina la necesidad de escobillas o contactos eléctricos para su funcionamiento [2].

2.2.3 Circuito equivalente del motor de inducción

El circuito equivalente en un motor de inducción se asemeja al de un transformador; sin embargo, la frecuencia del devanado secundario se ajusta en función de la velocidad relativa entre el estator y el rotor [2]. El circuito por fase, mostrado en la Figura 3, ilustra el funcionamiento del motor de inducción.

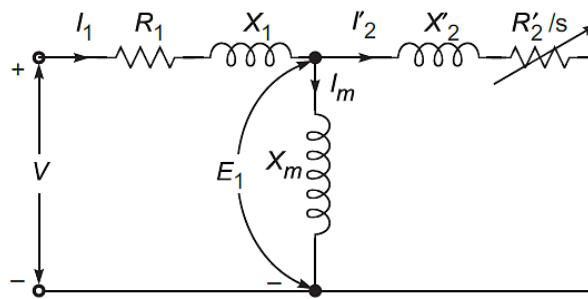


Figura 3. Circuito equivalente por fase de un motor de inducción [2].

Dentro del circuito magnético de un motor de inducción, el devanado estatórico desempeña el rol de devanado primario, similar a un transformador, y junto con el entrehierro, configura el circuito magnético del motor. Por otro lado, la jaula de ardilla se considera como un devanado secundario en cortocircuito [10]. Es importante destacar que el modelo de este motor no incluye una fuente de voltaje interno debido a que no tiene un circuito de campo independiente.

2.3 Características del motor de inducción jaula de ardilla

El motor de inducción jaula de ardilla, se emplea extensamente en varias aplicaciones debido a su bajo costo y su facilidad de mantenimiento. Es especialmente versátil, ya que puede funcionar

tanto en aplicaciones de alimentación en línea directa como en aplicaciones de variador de velocidad [11].

Los diferentes diseños y clases de rotor hacen que el motor se adapte a diferentes condiciones de trabajo lo cual es una ventaja significativa. Además, los parámetros de arranque, las características de velocidad y la potencia son esenciales para el rendimiento óptimo del motor de inducción de jaula de ardilla, ya que afectan su capacidad de respuesta, la generación de torque y el desempeño general [11].

2.3.1 Comportamiento de un motor de inducción jaula de ardilla

Para comprender el comportamiento del motor de inducción de jaula de ardilla en diversas condiciones, resulta esencial comprender las relaciones entre el par, velocidad y potencia, ya que, este tipo de motor, a medida que aumenta la carga en su eje, la velocidad tiende a disminuir ligeramente, mientras que el par se incrementa [2].

2.3.1.1 Relación potencia par de un motor de inducción

Los motores de inducción presentan una relación de potencia y par notoriamente distinta a la de los motores síncronos debido a su singularidad de tener una sola fuente de excitación [2]. Esta relación puede ser observada en el diagrama de la Figura 4, donde se refleja la relación entre la potencia eléctrica suministrada al motor y la potencia mecánica generada por el mismo.

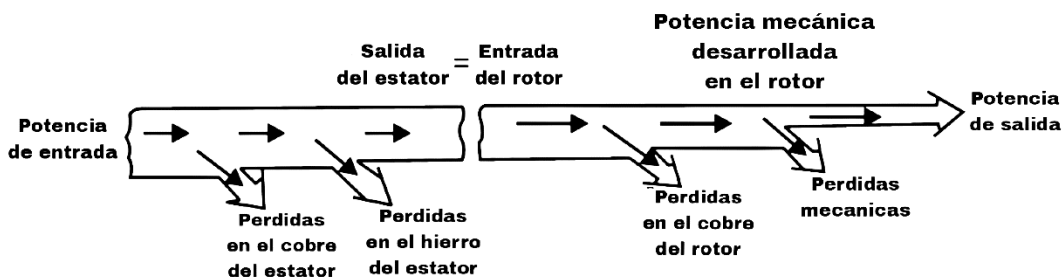


Figura 4. Diagrama de flujo de potencia de un motor de inducción [9].

En un motor de inducción, la potencia eléctrica se ve afectada por pérdidas en el estator y el rotor debido al efecto Joule, la histéresis y las corrientes parásitas, lo que reduce la potencia disponible. A medida que la energía atraviesa el entrehierro hacia el rotor, se convierte parcialmente en calor, mientras que la porción restante se transforma en energía mecánica. Además, las pérdidas rotacionales, como la fricción y el rozamiento con el aire, también afectan la eficiencia del motor y varían según la velocidad, las pérdidas en el núcleo del estator se reducen a velocidades más altas, sin embargo, las pérdidas debidas a la rotación incrementan [2].

2.3.1.2 Relación par-velocidad de un motor de inducción

Esta relación proporciona una perspectiva sobre el rendimiento del motor. Se puede ver en la Figura 5 una representación gráfica que divide en tres secciones la correlación entre el par y la velocidad de un motor de inducción. Dicha representación ilustra las variaciones del par inducido según la velocidad del motor de inducción, ajustándose a diferentes condiciones de carga [2].

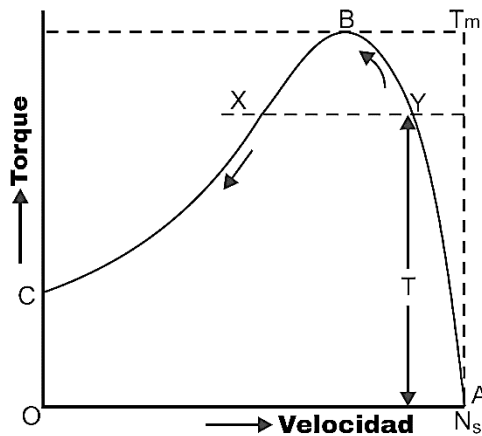


Figura 5. Curva característica par-velocidad de los motores de inducción [9].

En la región de bajo deslizamiento, el deslizamiento aumenta con la carga, lo que disminuye la velocidad del rotor. La reactancia del rotor es insignificante, lo que se refleja en un factor de potencia cercano a uno. Además, la corriente del rotor incrementa de manera proporcional al deslizamiento [2].

En la zona de deslizamiento moderado, la frecuencia del rotor se incrementa y su reactancia se vuelve comparable a su resistencia. En esta fase, el factor de potencia empieza a decrecer y se alcanza el punto de máximo par cuando el aumento de la carga equilibra el incremento de la corriente del rotor con la disminución del factor de potencia [2].

En la zona de alto deslizamiento, el par inducido disminuye a medida que la carga aumenta, una consecuencia de la disminución en el factor de potencia del rotor, complicando así la detección de incrementos en la corriente del rotor [2]. Típicamente, en motores de inducción, el par máximo en la curva fluctúa entre el 200% y el 250% del par nominal bajo carga completa, mientras que el par de arranque se aproxima al 150% de dicho par nominal con una velocidad inicial de cero [2].

2.3.2 Clases de diseño

La variación de las características del rotor en un motor de inducción puede generar diversas curvas de par velocidad, una por cada diseño, “La forma de la ranura que aloja las barras del rotor desempeña el papel fundamental en la definición del comportamiento de la característica par velocidad de la máquina, así como su eficiencia en función de la carga” [12].

La Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos (NEMA) ha establecido cuatro clasificaciones de diseño A, B, C y D para motores de inducción, con el fin de facilitar la selección de motores y potencias apropiados en diversas aplicaciones [2]. Esto se aplica especialmente al diseño del rotor y las prestaciones de los motores permitiendo a la industria elegir los motores más adecuados para satisfacer sus necesidades.

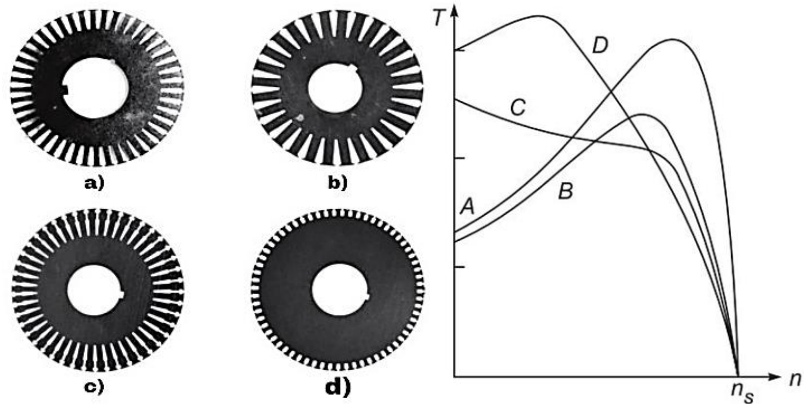


Figura 6. Clases de diseño y curvas par-velocidad del rotor jaula de ardilla [2], [13].

La Figura 6 ilustra las clases de diseño NEMA para los rotores de jaula de ardilla, junto con sus curvas típicas de par velocidad. Cada clase de diseño presenta características distintivas que los hacen adecuados para diferentes aplicaciones.

El diseño Clase A es ideal para aplicaciones con sobrecargas breves y frecuentes, como máquinas de moldeo por inyección. Tiene un alto par de ruptura y requiere un arranque con voltaje reducido para evitar problemas de caída de tensión. [2].

El diseño Clase B es adecuado para aplicaciones de uso general, como máquinas herramienta, ventiladores y bombas centrífugas. Ofrece un par de arranque similar al diseño Clase A, pero con un 25% menos de corriente de arranque [2].

El diseño de Clase C cuenta un par de arranque elevado, una baja corriente y un deslizamiento mínimo a plena carga, siendo ideal para aplicaciones como transportadores inclinados y trituradoras rotativas [2].

El diseño Clase D, ofrece un elevado par de arranque y baja corriente. Sin embargo, presenta un alto deslizamiento a plena carga debido a su construcción con barras de rotor más pequeñas y de mayor resistencia. Se utilizan en aplicaciones como bombas de pozos de petróleo y prensas punzonadoras de baja velocidad [2].

2.3.3 Tipos de rotores jaula de ardilla

Existen dos tipos comunes, los de jaula simple y doble jaula. El rotor de jaula simple consta de un conjunto de barras conductoras conectadas por anillos en ambos extremos. En cambio, el rotor de doble jaula cuenta con dos conjuntos de barras conductoras, uno interno y otro externo, ambos también conectados por anillos de cortocircuito en sus extremos. El rotor de jaula doble ofrece alta resistencia, elevado par bloqueado y baja corriente de arranque, lo que resulta en un alto par de arranque, además, es más eficiente que los motores de jaula simple de potencia similar [8]. En la jaula interna, las barras conductoras tienen una conexión débil con el estator, lo que implica baja resistencia y alta inductancia de fuga mientras que, los conductores de la jaula pequeña están estrechamente relacionados con el estator, lo que implica alta resistencia y baja inductancia de fuga [8].

En comparación con la jaula de ardilla simple, el rotor de doble jaula puede resultar más costoso debido a su diseño y se utiliza para lograr características de clase NEMA B y C [2].

2.3.4 Aislamiento de los rotores jaula de ardilla

En los motores eléctricos, el aislamiento tiene un rol fundamental al garantizar la separación entre los circuitos eléctricos de diferentes tensiones y los elementos metálicos conectados a tierra, los materiales aislantes utilizados evitan el flujo no deseado de corriente eléctrica, lo cual es crucial para proteger tanto la seguridad de los usuarios como la integridad de los equipos [7].

El aislamiento en los rotores jaula de ardilla se logra mediante diversos métodos y materiales, como recubrimientos aislantes, barras con aislamiento interno, materiales aislantes entre las barras y aislamiento de los extremos, estas medidas se implementan para prevenir cortocircuitos [14].

Para evitar fallas en el aislamiento, es necesario controlar la temperatura de los devanados, ya que

un aumento gradual puede debilitarlo y hacerlo susceptible a fallas por golpes, vibraciones o fatiga eléctrica [2].

2.3.5 Aplicaciones del motor de inducción jaula de ardilla

Los motores de inducción de jaula de ardilla resultan óptimos para aplicaciones industriales en los cuales la velocidad no debe ser constante, ya que estos motores experimentan una ligera reducción en su velocidad conforme aumenta la carga en su eje [15].

Los motores de inducción de jaula de ardilla destacan por su simplicidad y potencia. Son altamente confiables y eficientes, lo que los convierte en la elección preferida en diversas industrias. Se les utiliza en variadas aplicaciones que van desde equipos industriales hasta sistemas de calefacción, grúas y maquinaria pesada para la construcción. Su uso en la generación de energía eléctrica es restringido debido a ciertas limitaciones como generadores, como la capacidad de auto excitarse y la necesidad de operar a velocidades superiores a la síncrona [2].

Además, son versátiles al poder ser alimentados tanto por corriente alterna monofásica como trifásica, lo que los hace populares en diversas aplicaciones industriales, los motores de inducción monofásicos son capaces de arrancar por sí mismos y se utilizan en electrodomésticos tales como aspiradoras y lavadoras, mientras que los modelos trifásicos son apropiados para una variedad de aplicaciones generales que requieren hasta 55 kW de potencia [16].

2.3.6 Materiales utilizados en el rotor de inducción jaula de ardilla

Un rotor jaula de ardilla generalmente consta de dos materiales, el primero se utiliza para formar las barras, y es fundamental que posea una excelente conductividad eléctrica; el segundo se utiliza en el cuerpo del rotor y debe tener propiedades electromagnéticas satisfactorias, lo que implica una alta densidad de flujo de saturación, baja histéresis y alta resistividad, además, es importante que este material tenga buenas propiedades mecánicas a altas temperaturas [17].

Los materiales conductores comúnmente utilizados en la fundición de las barras rotores de jaula de ardilla son, el aluminio y el cobre. Actualmente el aluminio es la opción preferida por los fabricantes de motores debido a su baja temperatura de fusión de 660°C , su costo reducido y su baja densidad. Estas características proporcionan numerosas ventajas, como una menor inercia de arranque, menos estrés debido a las fuerzas centrífugas y una menor vibración en el rotor [8]. Por otro lado, el cobre muestra un gran potencial como material debido a su alta conductividad eléctrica, lo que permite una significativa reducción de las pérdidas de potencia en el rotor, a pesar de su temperatura de fusión más alta de 1083°C [8].

2.4 El motor de inducción jaula de ardilla con barras de cobre

La aplicación de las barras de cobre en los motores de inducción jaula de ardilla se centra en mejorar la eficiencia energética y el factor de potencia, que son factores cruciales para determinar la calidad de un motor de inducción, para mejorar la eficiencia y el factor de potencia de un motor, es importante reducir las pérdidas de cobre y controlar la temperatura en el rotor y estator, optimizar el deslizamiento a carga completa y mejorar el factor de potencia a plena carga [18].

Una de las opciones para mejorar la eficiencia del motor de inducción jaula de ardilla es reemplazar directamente la jaula de aluminio por una jaula de cobre sin alterar las dimensiones del rotor aplicando procesos de fundición [18]. Esto implica reducir las pérdidas de energía en el motor, como pérdidas por efecto Joule, pérdidas mecánicas y pérdidas por fricción en el rotor, además, busca optimizar el factor de potencia y la respuesta del motor ante variaciones de carga, gracias al uso de conductores más eficaces [19].

2.4.1 Características del motor de inducción jaula de ardilla con barras de cobre

Los motores de inducción jaula de ardilla con barras de cobre presentan características sobresalientes debido a la baja resistividad eléctrica del cobre. Las barras de cobre permiten una transferencia de corriente más eficiente, lo que permite una mayor corriente eléctrica en los rotores, resultando en motores más eficientes y potentes, la resistencia a la corrosión del cobre también garantiza una mayor tolerancia ambiental y confiabilidad [20]. Estas características hacen que los motores de cobre sean una elección preferida en aplicaciones que buscan eficiencia, rendimiento y confiabilidad.

Además, estos motores ofrecen características destacadas en términos de eficiencia y rendimiento sin necesidad de aumentar el tamaño del motor. Un ejemplo son los motores de la serie VZTE4, que cumplen con los estándares IEC60034-30-1 y poseen una eficiencia súper premium IE4. Estos motores destacan por su bajo nivel de ruido, poca vibración, amplio margen de seguridad en cuanto a la temperatura y una operación segura y confiable [20].

2.4.1.1 Ventajas y desventajas de la sustitución de las barras de aluminio por cobre en un motor de inducción jaula de ardilla

Al considerar la sustitución directa del material de la jaula del rotor, reemplazando el aluminio por cobre, la principal ventaja radica en la mejora de la eficiencia nominal del motor de inducción, que se sitúa en un rango de 0.5 a 1.25% [21]. Lo cual se debe a la menor resistividad del cobre y a una menor resistencia nominal del rotor, además, los rotores con jaula de ardilla de cobre experimentan temperaturas más bajas gracias a las menores pérdidas lo que reduce las pérdidas por efecto Joule [22].

Sin embargo, este método de aplicación puede tener un efecto negativo en la corriente de arranque del motor, incrementando la relación de corriente inicial a nominal en un rango del 0 al 25%. Lo

cual afecta el rendimiento inicial del motor, sin embargo, el impacto en el par de arranque varía según el diseño de la máquina, aumentando en diseños con baja relación de corriente y disminuyendo en aquellos con alta relación de corriente [21].

Se han desarrollado técnicas para abordar dicho problema e implica la optimización de la geometría del rotor y el estator, así como el diseño de las ranuras que alojan las barras lo que ocasiona que sean procesos que requieren una modificación completa del motor [22].

2.4.2 Análisis comparativo de las características de los materiales utilizados en el rotor

jaula de ardilla (Aluminio - Cobre)

El cobre tiene una conductividad eléctrica aproximadamente un 60% mayor que el aluminio, lo cual lo posiciona como un material superior para las barras de rotor en términos de rendimiento y eficiencia del motor, el cobre es empleado como material conductor en el rotor con el objetivo de reducir las pérdidas Joule debido a su baja resistividad en motores de alta potencia de inducción [23]. Sustituir las barras conductoras y los anillos terminales de aluminio por fundiciones de cobre conlleva mejoras notables en la eficiencia energética del motor, con reducciones de pérdidas motoras que oscilan entre el 15 y el 20% [8].

Las barras de cobre presentan una mayor densidad y resistencia mecánica en comparación con las barras de aluminio, lo que las convierte en una opción superior en términos de diseño y rendimiento del rotor en motores de inducción. A diferencia del aluminio, el cobre permite una mayor flexibilidad en el diseño, ya que ofrece diferentes niveles de resistencia sin requerir cambios en las herramientas utilizadas. Además, las barras de cobre son más adecuadas para soportar cargas de alta inercia, ya que generan menos calor y tensiones durante el arranque, lo que contribuye a una mayor durabilidad y eficiencia del motor [24].

El rango de pares de arranque de una jaula de cobre es comparable al de una jaula de aluminio con la misma superficie de ranura en el rotor. Esto implica que, para un par de arranque y relación máxima de corriente específicos, la geometría óptima de las ranuras del rotor será diferente al utilizar barras de cobre en lugar de barras de aluminio[22].

2.5 Métodos de aplicación de barras de cobre en motores de inducción jaula de ardilla

Las máquinas de inducción de jaula de ardilla con jaula de cobre se fabrican principalmente utilizando dos métodos distintos ya sea mediante un proceso de fundición a presión para formar un devanado homogéneo o fabricando barras de rotor y anillos extremos y conectándolos entre sí mediante un proceso de soldadura fuerte [25].

El método más comúnmente utilizado para producir rotores de cobre es la fundición a presión, donde se aplica alta temperatura y presión al cobre en el molde. Sin embargo, este proceso tiene desventajas, como el alto costo de las herramientas de fundición, la limitada flexibilidad en los cambios de diseño y la posibilidad de generar poros en los anillos finales, afectando la resistencia mecánica del rotor [26].

Por otro lado, otra de las técnicas es la fabricación de rotores de cobre mediante soldadura fuerte, donde las barras de cobre y los anillos finales se unen eléctricamente. Sin embargo, esta técnica también presenta desventajas, como altas tensiones térmicas en las laminaciones, ablandamiento de las barras de cobre y los anillos finales, largos tiempos de ciclo y susceptibilidad a defectos de interconexión [26].

La mejora reciente en las tecnologías de fundición a presión del cobre ha hecho que las jaulas de cobre sean una solución económicamente viable para motores de baja y mediana potencia [22]. Sin embargo, debido a las limitaciones en las técnicas de procesamiento, en motores de gran tamaño se utilizan barras de cobre prefabricadas en lugar de cobre fundido [23].

2.5.1 Aplicaciones del motor de inducción jaula de ardilla con barras de cobre

Los motores de inducción de jaula de ardilla con barras de cobre se utilizan en aplicaciones que requieren motores de voltajes medios y altos debido a su mayor eficiencia, estas aplicaciones incluyen motores industriales, bombas, compresores, grúas, aviación, alta velocidad, husillos y motores especiales para uso militar, entre otros [20].

Además, son utilizados en aplicaciones de tracción, como los vehículos eléctricos [27]. Si bien los motores de imanes permanentes dominan el mercado por su alta eficiencia y excelente factor de potencia, los motores de inducción de jaula de ardilla permanecen como una alternativa competitiva, aunque con una eficiencia y un factor de potencia algo inferiores. Estos últimos aprovechan tecnologías bien establecidas y se emplean frecuentemente en aplicaciones con variadores de velocidad [28].

Un ejemplo es el motor de inducción trifásico jaula de ardilla con barras de cobre de 310 kW y 600 Nm que equipa el vehículo eléctrico de alto rendimiento Model S de Tesla, Este motor puede acelerar de 0 a 100 km/h en menos de 4 segundos y alcanzar una velocidad máxima de 215.7 km/h [29]. Es altamente eficiente, superando incluso al motor de inducción jaula de ardilla de barras de aluminio puro del vehículo Audi e-Tron, que tiene una eficiencia del 92%, alcanzado el 93,4% [30].

CAPÍTULO III

Marco metodológico

A continuación, en este capítulo, se presentan los métodos y materiales utilizados en el estudio y desarrollo del prototipo de motor de inducción tipo jaula de ardilla con barras de cobre. En este apartado, se detallan las diversas técnicas y métodos de investigación empleados para alcanzar cada uno de los objetivos establecidos. Además, se proporciona una minuciosa descripción de los procedimientos de todas las actividades llevadas a cabo, incluyendo los materiales y herramientas utilizadas, que abarcan equipos, software, modelos matemáticos y ecuaciones.

3.1 Descripción del lugar

El prototipo representativo del motor de inducción trifásico de jaula de ardilla con barras de cobre se encuentra destinado a someterse a ciertas pruebas experimentales en los laboratorios de la carrera de Electricidad, ubicado en el campus de la Universidad Técnica del Norte. Además, el prototipo de motor junto al horno eléctrico de fusión de metales estarán disponibles en el mismo lugar para fomentar el estudio, prácticas de laboratorio y diseño de máquinas eléctricas entre los estudiantes.

3.2 Metodología

La metodología empleada en la ejecución del presente proyecto adopta un enfoque teórico experimental que implica la investigación científica, el estudio de la maquina eléctrica mediante herramientas computacionales y la implementación de un prototipo representativo de un motor jaula de ardilla con barras de cobre. Durante este proceso, se han empleado una variedad de métodos y técnicas de investigación con el propósito de establecer un enfoque de trabajo cohesivo y efectivo.

En la elaboración del marco teórico, se empleó el método documental, basado en una revisión exhaustiva de investigaciones científicas anteriores sobre motores de inducción tipo jaula de ardilla, con un enfoque particular en la caracterización y uso del cobre como material conductor en las barras del rotor. La revisión bibliográfica permitió realizar un análisis detallado del estado actual del arte, explorando diversos métodos para optimizar los motores de inducción.

Mediante el enfoque cuantitativo, se emplearon ecuaciones matemáticas para determinar los parámetros del circuito equivalente del motor de inducción con barras de aluminio y cobre, facilitando así la estimación de sus características. La simulación computacional desempeñó un papel fundamental al integrar modelos matemáticos y permitir el análisis electromagnético, y estimación de la curva par velocidad de la maquina proporcionando una comprensión detallada del comportamiento del motor. La implementación del prototipo se fundamentó en el método experimental, que conllevó la modificación del rotor y el reemplazo de las barras conductoras de aluminio por barras de cobre. Las pruebas de laboratorio complementaron este proceso, permitiendo la evaluación del desempeño del motor en condiciones controladas. A lo largo de la fase experimental y de simulación, la observación fue esencial para recopilar datos precisos y llevar a cabo un análisis detallado del motor antes y después de la modificación de los materiales conductores en las barras del rotor.

Por último, el análisis comparativo entre el motor de inducción de jaula de ardilla convencional y el prototipo permitió evaluar la viabilidad técnica de este tipo de modificaciones. Además, se analizaron los riesgos asociados con su fabricación y el potencial operativo obtenido en el prototipo. Este estudio detallo si la implementación del prototipo conduce a beneficios significativos en relación con la inversión realizada.

3.3 Procedimiento

A lo largo de la ejecución de este proyecto, se desarrollaron diversas actividades que comprendieron tanto la investigación científica como el análisis detallado del motor. Estas actividades involucraron la resolución de ecuaciones matemáticas y de simulaciones computacionales y una serie de pruebas de funcionamiento experimentales. Para proporcionar una representación visual de estas actividades, en la Figura 7 se incluye un diagrama de bloques que detalla las etapas ejecutadas a lo largo del presente proyecto.

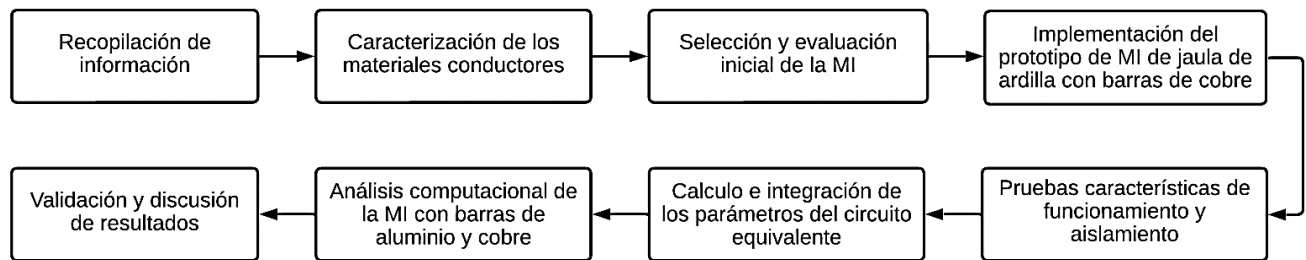


Figura 7. Diagrama de bloques descriptivo de las actividades realizadas.

La recopilación de información se sustentó en una exhaustiva revisión del estado actual del arte, lo que permitió evaluar las propiedades y principios fundamentales de la máquina de inducción, incluyendo las características, tipos, aplicaciones, las técnicas y ventajas relacionadas con la aplicación de cobre en las barras del rotor de un motor de inducción tipo jaula de ardilla.

La caracterización de los materiales conductores involucró un análisis comparativo entre el aluminio y el cobre. En este proceso, se evaluaron una serie de parámetros técnicos, que incluyen la resistividad eléctrica y mecánica, el peso, la temperatura de fusión, entre otros aspectos relevantes de ambos materiales. Además de examinar las características de las máquinas eléctricas al emplear estos materiales conductores en las barras del rotor.

En la etapa de selección y evaluación de la máquina de inducción, se adquirió un motor trifásico de jaula de ardilla de la marca Weg W22 High Efficiency. Este motor, en valores nominales posee

una potencia de $\frac{1}{2}$ HP, opera a una tensión de 220V en configuración delta, con una corriente de 1.87A. La velocidad del rotor es de 1700 RPM, acompañada de un factor de potencia de 0.72, una eficiencia del 72.0%, y un factor de servicio de 1.15. Además, la máquina fue sometida a pruebas de funcionamiento en condiciones controladas y se recopilieron datos relevantes sobre voltajes, corrientes y potencia, con la finalidad de determinar el circuito equivalente respectivo.

Durante los cálculos, se emplearon ecuaciones matemáticas para determinar los parámetros del circuito equivalente por fase del motor en base a los datos recopilados durante las pruebas de funcionamiento. Además, se determinó el par máximo, deslizamiento y par de arranque mediante equivalentes de Thévenin. Estos valores representaron los puntos para graficar la curva par velocidad del motor.

Durante la implementación del prototipo, se intervino en el rotor del motor seleccionado para el proyecto con el propósito de reemplazar las barras de aluminio por barras de cobre. Inicialmente, se desmontó el motor para acceder al rotor y realizar mediciones detalladas, las cuales sirvieron de base para crear moldes destinados a los anillos de cortocircuito y las nuevas barras del rotor y de la misma manera realizar el diagrama del motor en FEMM. Posteriormente, se llevaron a cabo perforaciones longitudinales en el rotor con brocas metálicas para remover las barras de aluminio. Tras completar esta fase, se verificó minuciosamente el trabajo realizado para identificar y corregir cualquier irregularidad. En el siguiente proceso, para las barras conductoras del rotor se introdujeron conductores sólidos de cobre de 10 AWG y 8 AWG en cada una de las ranuras del rotor, posteriormente se utilizó la técnica de fundición para formar los anillos de cortocircuito mediante el proceso de fundición con un horno fundidor de metales digital, manteniendo una temperatura constante de 1083 °C para garantizar una fundición precisa y controlada del cobre. El cobre fundido se vertió directamente sobre los moldes y el rotor, dejándose enfriar a temperatura

ambiente. Finalmente, se pulieron los anillos de cortocircuito en base a las dimensiones originales del rotor y se realizó una minuciosa inspección del nuevo sistema conductor de los anillos de cortocircuito del rotor para identificar y corregir posibles irregularidades, se barnizó el rotor para evitar la corrosión y se reensambló la máquina eléctrica.

El prototipo fue sometido a un conjunto idéntico de pruebas de funcionamiento que se aplicaron al modelo inicial de la MI en los laboratorios de la carrera de Electricidad. Estas pruebas tenían como objetivo principal determinar la variación de los parámetros eléctricos y deducir los parámetros del circuito equivalente por fase del prototipo. Mientras que la prueba de aislamiento del prototipo se realizó con la finalidad de verificar el estado de la MI.

En la fase de análisis computacional, se emplearon herramientas especializadas para validar códigos matemáticos y representar gráficamente la máquina de inducción. Se utilizaron programas de simulación electromagnética, como FEMM, para generar un dibujo a escala 1:1 del motor estudiado a partir de las dimensiones originales del rotor y estator, lo que permitió un análisis electromagnético detallado considerando la corriente del estator y del rotor. Asimismo, en MATLAB y SIMULINK, se desarrolló un código y se diseñó un diagrama de bloques con el fin de evaluar las curvas características del motor en función del material de las barras del rotor.

Además, se realizó un análisis focalizado en las características y el rendimiento del motor antes y después de la modificación, para evaluar la factibilidad del proyecto.

3.4 Materiales utilizados para el estudio e implementación del motor jaula de ardilla con barras de cobre

A continuación, se describen los materiales necesarios para realizar el estudio e implementación de un motor de inducción tipo jaula de ardilla con barras de cobre, abarcando aspectos teóricos y computacionales y realizar un análisis detallado del funcionamiento mediante cálculos

matemáticos y pruebas experimentales. Además, se proporcionan las ecuaciones matemáticas necesarias para calcular las características de la máquina eléctrica.

3.4.1 Programas computacionales

Los programas computacionales desempeñan un papel fundamental al permitir el análisis detallado de las máquinas eléctricas a través de una variedad de funciones especializadas. Además, posibilitan la experimentación y evaluación del comportamiento de estas máquinas al modificar sus variables. A continuación, se presenta una breve descripción de las herramientas computacionales utilizadas en el estudio de motores de inducción tipo jaula de ardilla, así como una recopilación de investigaciones previas en las que distintos autores emplearon estas herramientas para el estudio computacional de máquinas eléctricas.

3.4.1.1 FEMM

FEMM (Finite Element Method Magnetics) es un software versátil de acceso libre diseñado para resolver problemas electromagnéticos en configuraciones bidimensionales. Destaca por su capacidad para abordar situaciones magnéticas estáticas, armónicas, problemas electrostáticos y flujos de calor estacionarios mediante el método de elementos finitos. Su entorno interactivo, con integración de Lua para secuencias de comandos y geometrías paramétricas, lo hace ideal para la simulación y análisis de configuraciones magnéticas. [31].

Este software, como se ejemplifica en el artículo [32], es fundamental para optimizar el diseño de motores de inducción, destacando su importancia en las simulaciones de características y eficiencia de máquinas eléctricas, según señala otro artículo, ver [33]. Además, se integra fácilmente con MATLAB, permitiendo trabajar en diversos modelos, desde la configuración de componentes hasta la evaluación completa del sistema, abarcando análisis de elementos finitos para evaluar el rendimiento magnético, térmico, electrostático y el flujo de corriente en estructuras 2D [34].

3.4.1.2 Matlab

MATLAB de MathWorks, es un software licenciado y ampliamente usado en ciencia e ingeniería. Su enfoque basado en matrices simplifica la representación de conceptos matemáticos, y su capacidad de automatización y personalización mediante scripts y funciones lo convierte en una herramienta versátil. Al integrarse con otros lenguajes y bibliotecas, amplía su funcionalidad, siendo respaldado por herramientas especializadas y pruebas rigurosas para abordar desafíos en estos campos [35].

Permite modelar y simular motores de inducción, lo que ayuda a identificar sus parámetros. Estos parámetros se obtienen a través de un modelo dinámico en el software, mediante su integración con FEMM o directamente de las pruebas experimentales realizadas a la máquina eléctrica [36],[37]. Esto posibilita un análisis detallado del rendimiento de los motores de inducción, como se demuestra en el artículo [36]. Además, MATLAB y SIMULINK se emplean para predecir el comportamiento de máquinas eléctricas, como se ilustra en el artículo [38].

3.4.1.3 Simulink

Simulink, integrado con MATLAB, es una plataforma de simulación y modelado que simplifica el diseño y evaluación de sistemas dinámicos mediante un enfoque de diagrama de bloques. La interconexión de bloques permite construir modelos de sistemas, incluyendo diversos dominios en una única simulación. Con una interfaz gráfica intuitiva y capacidad de personalización de bloques, facilita la incorporación de algoritmos y el análisis de resultados [35].

3.4.2 Equipos

A continuación, se detallan las características técnicas de los equipos utilizados para la implementación y análisis del motor jaula de ardilla con barras de cobre.

3.4.2.1 Kit de horno eléctrico de fusión de metales

Un horno fundidor de metales es una máquina utilizada para fundir metales sólidos. En el contexto de este estudio, se utilizó un horno fundidor de la marca ToAuto, para fundir el cobre. Las especificaciones técnicas de esta máquina se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1

Características del horno eléctrico digital fundidor de metales ToAuto [39].

Marca	ToAuto
Modelo	TGF3000
Potencia	1400 W
Voltaje de alimentación	110V/220V
Temperatura máxima	1100 °C/2000 F
Capacidad	3Kg

La máquina utiliza un sistema de control avanzado con módulo PID para garantizar una fusión precisa de metales, ajustando la temperatura en tiempo real y evitando sobrecalentamientos o enfriamientos no deseados. Su eficaz aislamiento térmico mantiene el calor y previene la entrada de oxígeno, asegurando un proceso de fusión limpio [39].

3.4.2.2 Motor trifásico jaula de ardilla

En este estudio, se empleó un motor de inducción trifásico tipo jaula de ardilla de baja potencia ($\frac{1}{2}$ HP), con el objetivo de analizar su comportamiento y corroborar las teorías presentadas en el marco teórico. La elección de un motor de baja potencia se debe a la necesidad de minimizar los riesgos asociados y los costos operativos, lo que resulta en un entorno más seguro y económico para las pruebas experimentales. Los detalles del motor se ilustran en la Figura 8.

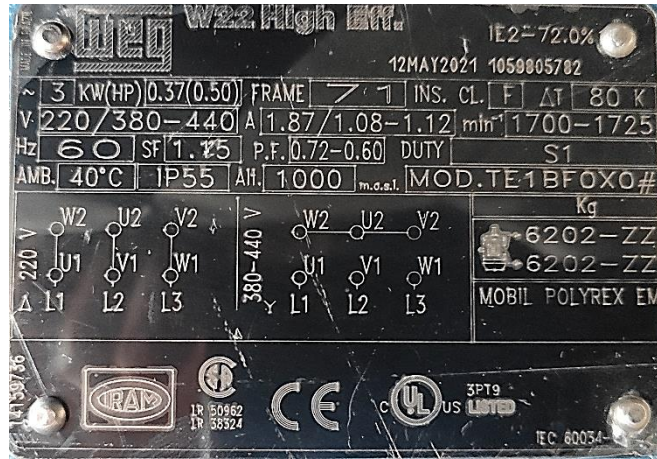


Figura 8. Datos de placa del motor de inducción trifásico estudiado.

El motor Weg High Eff. Modelo MOD.TE1BFOXO#, es un motor de inducción trifásico tipo jaula de ardilla de ½ HP, con una eficiencia del 72%. Admite tensiones de alimentación de 220V a 380V-440V, con configuración de terminales del devanado estático en delta para 220V y en estrella para 380V o 440V.

3.4.2.3 Pinza de potencia

Una pinza de potencia es una herramienta que combina las funciones de un multímetro digital con la capacidad de medir corriente. En este estudio, se utilizó la pinza de potencia Amprobe ACD-45PQ. Los detalles técnicos específicos de este equipo se encuentran en la Tabla 2.

Tabla 2

Características de la pinza de potencia Amprobe ACD-45PQ [40].

Marca	Amprobe
Modelo	ACD-45PQ
Voltaje CA/CC	600V
Corriente alterna máxima	600A
Resistencia	999,9 Ω

Potencia Activa	0 kW - 360,0 kW
Potencia reactiva	0 kVAR - 360,0 kVAR
Potencia aparente	0 kVA - 360,0 kVA

Este equipo es reconocido por su capacidad para medir potencia, energía y factor de potencia en sistemas, ya sean monofásicos o trifásicos, equilibrados o desequilibrados. Además, cuenta con detección de verdadero valor eficaz y garantiza mediciones precisas en voltajes de corriente alterna y continua [41].

3.4.2.4 Medidor de resistencia de aislamiento

Un megger es un dispositivo que mide la resistencia de aislamiento de conductores o bobinados con respecto a tierra o entre fases. En este estudio, se empleó un medidor de resistencia de aislamiento de la marca Fluke. Los detalles técnicos específicos de este equipo se encuentran en la Tabla 3.

Tabla 3

Características del Medidor de resistencia de aislamiento Fluke 1507 [42].

Marca	Fluke
Modelo	1507
Voltaje CA/CC	0.1V-600V
Rango de prueba de aislamiento	0.01M Ω a 10G Ω
Voltajes de prueba de aislamiento	50V-100V

El medidor Fluke 1507 es un probador de resistencia de aislamiento avanzado, compacto y resistente. Facilita cálculos automáticos para el índice de polarización y la relación de absorción dieléctrica, simplificando y agilizando las pruebas repetitivas [42].

3.4.2.5 Fuente de alimentación digital de corriente continua (CC)

Una fuente de alimentación en CC es un equipo que convierte la corriente alterna (CA) de entrada en CC, y ofrece la posibilidad de ajustar con precisión los niveles de voltaje y corriente en su salida. Durante este estudio, se utilizó una fuente de la marca Yescom, del laboratorio de la carrera de Electricidad. Los detalles técnicos de este equipo de encuentran en la Tabla 4.

Tabla 4

Características de la fuente de alimentación de CC [43].

Maraca	Yescom
Modelo	B00SWK6M0M
Voltaje de entrada (AC)	110V
Voltaje de salida (CC)	0V-30V
Corriente de salida (CC)	0A-10A

Este equipo, proporciona protección contra sobrevoltaje, sobrecalentamiento y cortocircuitos para salvaguardar la carga y la fuente de alimentación. Puede operar como fuente de corriente continua con voltaje o corriente constantes, cambiando automáticamente entre estos modos [43].

3.4.2.6 Auto Transformador de corriente alterna (CA)

Un autotransformador de corriente alterna es un transformador cerrado y no aislado que se caracteriza por su capacidad de ajuste y por incluir un medidor de voltaje de salida. Durante este estudio, se utilizó un autotransformador de la marca Yaeccc, del laboratorio de la carrera de Electricidad. Los detalles técnicos de este equipo de encuentran en la Tabla 5.

Tabla 5

Características del autotransformador de CA

Marca	Yaecc
Modelo	B078Z7GL9H
Voltaje de alimentación (AC)	110V
Potencia	1kVA
Voltaje de salida (AC)	0V-130V
Frecuencia de entrada y salida	60Hz

Este dispositivo es ideal para el control de la velocidad de un motor, ya que opera como un transformador variable. La velocidad del motor es ajustable de forma continua, y a diferencia de los controladores de velocidad electrónicos, no introduce ruidos ni zumbidos, ya que no interrumpe la forma de onda de corriente alterna.

3.4.3 Análisis experimental del motor de inducción jaula de ardilla

Dentro del análisis experimental, se consideró la norma IEEE 112 como referencia, dada su utilidad en la implementación de pruebas generales para máquinas polifásicas de inducción [44]. En este contexto, se llevaron a cabo pruebas características de funcionamiento que incluye la prueba de vacío, corriente continua y rotor bloqueado con el objetivo de obtener datos necesarios para definir los parámetros del circuito equivalente del motor. Realizar estas pruebas con precisión en entornos controlados es crucial, considerando que las resistencias del motor pueden fluctuar con los cambios de temperatura [2]. A continuación, se presentan descripciones detalladas y los diagramas de conexión para cada una de estas pruebas.

3.4.3.1 Prueba en vacío

Durante esta prueba, el motor funciona sin carga, con el voltaje y una frecuencia establecida de 60Hz. A lo largo de la prueba, se efectúan mediciones de voltaje, corriente y potencia de entrada al motor. El diagrama de conexión necesario para realizar esta prueba se ilustra en la Figura 9.

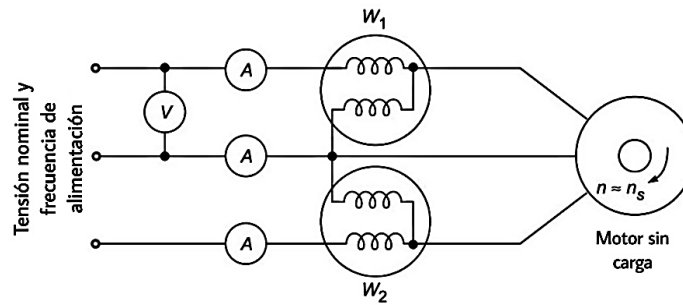


Figura 9. Esquema de conexión para efectuar la prueba de vacío [2].

En el motor de inducción, las pérdidas en el núcleo se limitan al estator debido al bajo deslizamiento, generando una baja frecuencia de corriente en el rotor, aproximadamente 0.05 Hz. La corriente sin carga representa alrededor del 30-40% de la corriente a plena carga, influida por las características del entrehierro [2].

3.4.3.2 Prueba de corriente directa (DC)

El objetivo de esta prueba es determinar la resistencia del estator, conocida como R_1 , aplicando voltaje en DC a los devanados del estator del motor. La aplicación de corriente continua impide la inducción de voltaje en el circuito del rotor, lo cual a su vez previene la creación de flujo de corriente en dicho rotor.

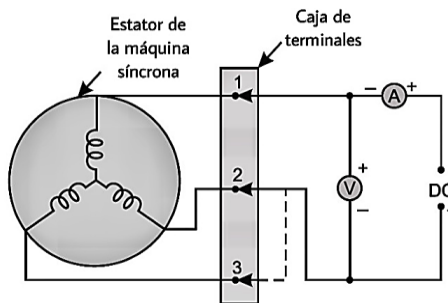


Figura 10. Esquema de conexión para efectuar la prueba de corriente continua [9].

3.4.3.3 Prueba de rotor bloqueado

La prueba de rotor bloqueado, también llamada prueba de rotor enclavado es análoga a una prueba de cortocircuito en un transformador. Requiere la inmovilización del rotor y la aplicación de un

voltaje al motor [2]. El diagrama de conexión para efectuar esta prueba se muestra en la siguiente Figura.

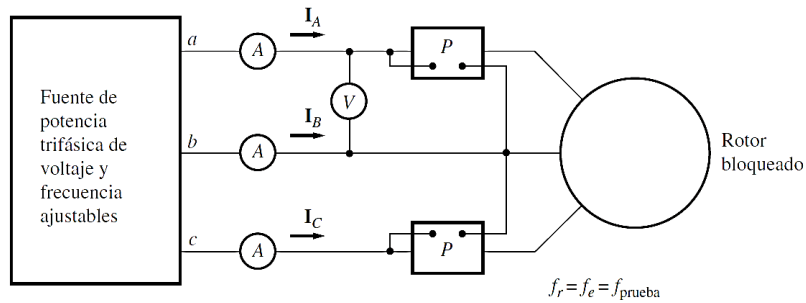


Figura 11. Esquema de conexión para efectuar la prueba de rotor bloqueado [13].

Durante esta prueba, es esencial que la corriente se asemeje a su valor nominal, ya que las reactancias del motor son sensibles a la saturación en el núcleo magnético [2].

3.4.4 Ecuaciones matemáticas utilizadas para el estudio de la MI

A continuación, se detallan las ecuaciones matemáticas utilizadas durante el estudio del motor de inducción para determinar los parámetros del circuito equivalente, basándose en los resultados obtenidos en las pruebas características de funcionamiento.

3.4.4.1 Deslizamiento de la máquina de inducción

El deslizamiento en un motor de inducción corresponde a la velocidad relativa, representada como una fracción de uno o en términos porcentuales [2]. La Ecuación 1 es la que define el deslizamiento en una máquina eléctrica [2].

$$S = \frac{n_{sinc} - n_m}{n_{sinc}} (\times 100\%) \quad (1)$$

Donde, S es el deslizamiento de la máquina, (n_{sinc}) es la velocidad síncrona del motor y (n_m) es la velocidad del rotor.

3.4.4.2 Frecuencia eléctrica del rotor

La frecuencia de las corrientes inducidas en el rotor se determina a partir de la Ecuación 2, donde, (f_r) es la frecuencia del rotor, S , el deslizamiento y (f_e) la frecuencia del sistema [2].

$$f_r = S f_e \quad (2)$$

3.4.4.3 Deducción del circuito equivalente del motor de inducción jaula de ardilla

En el circuito equivalente de la MI, ilustrado en la Figura 3. R_1 , denota la resistencia del estator, mientras que X_1 indica la reactancia del estator. X_m se refiere a la reactancia de magnetización, y X_2 representa la reactancia del rotor. La resistencia del rotor, ajustada por el deslizamiento, se expresa como R_2/s . I_1 es la corriente que se suministra al estator, que generalmente es el promedio de las corrientes de línea mientras que, I_2 es la corriente que fluye hacia el rotor [2]. A pesar de que existen múltiples enfoques para resolver el circuito equivalente del MI y calcular la corriente I_2 , aplicar el método de Thévenin sigue siendo el enfoque más simple y efectivo.

3.4.4.4 Parámetros de modelo del circuito equivalente de la MI

Este proceso se basa en la determinación de los parámetros de las variables del circuito equivalente, que incluye las resistencias e inductancias del rotor y el estator y de igual manera la reactancia de magnetización. A partir de los datos obtenidos durante las pruebas de funcionamiento realizadas a los motores.

El voltaje de fase puede ser determinado a partir de la Ecuación 3. Donde (V_T) , es el voltaje de línea del sistema trifásico el cual alimentan al motor [2].

$$V_\phi = \frac{V_T}{\sqrt{3}} \quad (3)$$

La potencia de entrada del motor se determina mediante la Ecuación 4. Donde (V_T) , es el voltaje de línea del sistema, (I_L) , es la corriente de línea promedio y (θ) , es el ángulo el cual es igual al factor de potencia de la máquina [2].

$$P_{ent} = \sqrt{3}V_T I_L \cos \theta \quad (4)$$

Mediante los datos obtenidos durante la prueba DC del motor y la Ecuación 5, se determina la resistencia del estator. Donde (V_{CD}), es el voltaje en corriente directa aplicado al motor y (I_{CD}), es la corriente en DC resultante al aplicar dicho voltaje [2].

$$R_1 = \frac{V_{CD}}{2I_{CD}} \quad (5)$$

En el caso de este estudio esta resistencia fue determinada directamente haciendo uso de un Medidor de resistencia de aislamiento de la marca Fluke.

Los datos obtenidos durante la prueba en vacío del motor inducción, permite determinar las pérdidas de cobre en el estator (P_{PCE}), la potencia de entrada (P_{entr}), las perdidas rotatorias en el motor (P_{rot}) y la impedancia (Z_{sc}).

La impedancia (Z_{sc}), puede ser determinada mediante la Ecuación 6. Donde, (V_ϕ), es el voltaje de fase y (I_L), es la corriente promedio del sistema [2].

$$|Z_{sc}| = \frac{V_\phi}{I_L} \quad (6)$$

Las pérdidas del cobre en el estator del motor pueden ser determinadas mediante la Ecuación 7. Donde (I_1), es igual a ($I_{L,prom}$) y (R_1), es igual a la resistencia del estator [2].

$$P_{PCE} = 3I_1^2 R_1 \quad (7)$$

Las pérdidas rotatorias pueden ser determinadas mediante la Ecuación 8, donde (P_{entr}), es la potencia de entrada y ($P_{SCL,SC}$), es igual a las pérdidas de cobre en el estator (P_{PCE}).

$$P_{rot} = P_{entr} - P_{SCL,SC} \quad (8)$$

La prueba del rotor bloqueado permite la determinar la impedancia ($|Z_{eq}|$), junto al ángulo, la reactancia del rotor bloqueado (X'_{RB}), y la reactancia equivalente (X_{RB}), mediante el cual se determina la reactancia del estator (X_1), y la reactancia de magnetización, (X_m). La impedancia

del rotor bloqueado se determina mediante la Ecuación 9. Donde (V_T), es el voltaje total del sistema, es decir, el voltaje de línea y (I_A), es igual a ($I_{L,prom}$) [2].

$$|Z_{RB}| = \frac{V_T}{\sqrt{3}I_A} \quad (9)$$

El ángulo de impedancia se puede determinar mediante la Ecuación 10. Donde (P_{entr}), es la potencia de entrada del motor durante la prueba de rotor bloqueado, (V_T), es el voltaje de línea del sistema y (I_L), es la corriente de línea promedio [2].

$$\theta = \cos^{-1} \frac{P_{entr}}{\sqrt{3}V_T I_L} \quad (10)$$

La resistencia del rotor se puede determinar mediante la Ecuación 11. Donde (Z_{RB}), es la impedancia del rotor bloqueado, mientras que (θ), es el ángulo de impedancia.

$$R_{RB} = |Z_{RB}| \cos(\theta) ; R_2 = R_1 - R_{RB} \quad (11)$$

La reactancia del rotor durante la prueba del rotor bloqueado se determina mediante la Ecuación 12. Donde (R_{RB}), es igual a la impedancia de rotor bloqueado (Z_{RB}), y el ángulo (θ), es igual al ángulo de la impedancia [2].

$$X'_{RB} = R_{RB} \sin \theta \quad (12)$$

La reactancia equivalente en base a la frecuencia del sistema se determina mediante la Ecuación 13. Donde (f_{nom}), es la frecuencia nominal de 60 Hz, mientras que (f_{prueba}), es la frecuencia utilizada durante la prueba el cual se determina mediante la ecuación 2 y (X'_{RB}), es la reactancia del rotor durante la prueba del rotor bloqueado [2].

$$X_{RB} = \frac{f_{nom}}{f_{prueba}} X'_{RB} \quad (13)$$

En la determinación de las reactancias del estator y el rotor, no hay una manera sencilla de desglosar sus contribuciones por separado. Sin embargo, según la literatura [13], motores con

diseños específicos muestran relaciones definidas entre estas reactancias por lo que presenta reglas prácticas para dividir las reactancias del estator y el rotor.

En el caso del diseño clase B, la reactancia del rotor es mayor a la del estator. Por lo que esta puede ser determinada mediante la Ecuación 14. Donde (X_{RB}), es la reactancia equivalente del rotor bloqueado en base a la frecuencia del sistema [2].

$$X_1 = X_{RB}(0.4) \quad ; \quad X_2 = X_{RB}(0.6) \quad (14)$$

Por lo que la reactancia de magnetización equivalente puede ser determinada mediante la Ecuación 15. Donde (Z_{SC}), es la impedancia del rotor en vacío y (X_1), es igual a ($X_{RB}/2$) [2].

$$X_M = |Z_{SC}| - X_1 \quad (15)$$

La determinación de los parámetros del circuito equivalente facilita su simplificación mediante el modelo de Thévenin, lo cual proporciona, a su vez, datos esenciales sobre el deslizamiento y el par del motor de inducción. Esto permite establecer los puntos necesarios para trazar la curva característica de velocidad del motor.

3.4.4.5 Equivalentes de Thévenin

De acuerdo con la teoría de Thévenin, es posible representar cualquier circuito lineal, que pueda ser delimitado por dos terminales, mediante una única fuente de voltaje en serie con una impedancia equivalente [2]. La representación de este circuito se ilustra en la Figura 12.

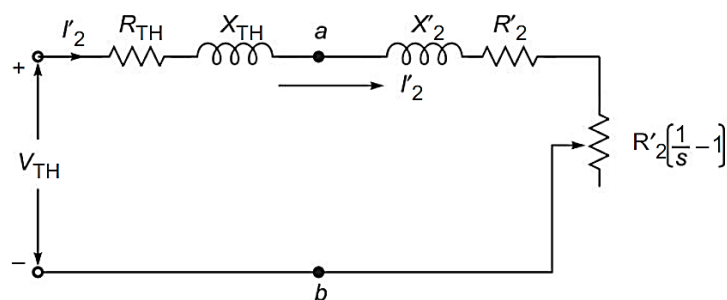


Figura 12. Circuito equivalente resultante simplificado de un motor de inducción [2].

En este circuito equivalente, el voltaje de Thévenin puede ser determinado con la ecuación 16. Donde (V_{ϕ}), es el voltaje de fase del sistema, (X_M), es la reactancia de magnetización, (R_1), es la resistencia del estator y (X_1), la reactancia del estator [2].

$$V_{TH} = V_{\phi} \frac{X_M}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_M)^2}} \quad (16)$$

La resistencia de Thévenin se determina con la Ecuación 17. Donde (R_1) es la resistencia del estator, (X_1), la reactancia del estator y (X_M), es la reactancia de magnetización [2].

$$R_{TH} \approx R_1 \left(\frac{X_M}{X_1 + X_M} \right)^2 \quad (17)$$

Mientras que la reactancia de Thévenin (X_{TH}) es igual a la reactancia del estator (X_1) $X_{TH} \approx X_1$ [2]

Las ecuaciones derivadas del circuito equivalente de Thévenin son fundamentales para obtener la corriente I_2 y los valores requeridos en el cálculo del par máximo, el punto de deslizamiento en el que se produce el par máximo y el par de arranque del motor. La corriente I_2 se determina mediante la Ecuación 18.

$$I_2 = \frac{V_{TH}}{\sqrt{\left(R_{TH} + \frac{R_2}{S}\right)^2 + (X_{TH} + X_2)^2}} \quad (18)$$

El deslizamiento del motor con relación al par máximo se determina mediante la Ecuación 19. Donde, (R_2), es la resistencia del rotor, (R_{TH}), es la resistencia equivalente de Thevenin, (X_{TH}), es la reactancia equivalente de Thevenin y (X_2), es la reactancia del estator [2].

$$S_{max} = \frac{R_2}{\sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2}} \quad (19)$$

La velocidad mecánica correspondiente al par máximo se determina mediante la Ecuación 20. Donde, S , representa el deslizamiento máximo, mientras que (n_{sinc}) , es la velocidad síncrona de la máquina, expresada en RPM [2].

$$n_m = (1 - S)n_{sinc} \quad (20)$$

El par máximo del motor en función de la velocidad mecánica se determina a partir de la Ecuación 21. Donde (V_{TH}) , es el voltaje equivalente de Thevenin, (ω_{sinc}) , es la velocidad síncrona de la máquina expresada en rad/s, (R_{TH}) , es la resistencia equivalente de Thevenin, (X_{TH}) , es la reactancia equivalente de Thevenin y (X_2) , es la reactancia del estator [2].

$$\tau_{max} = \frac{3V_{TH}^2}{2\omega_{sinc}[R_{TH} + \sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2}]} \quad (21)$$

El par de arranque del motor se determina a partir de la Ecuación 22. Donde V_{TH} , es el voltaje equivalente de Thevenin, (R_2) , es la resistencia del rotor, (ω_{sinc}) , es la velocidad síncrona de la máquina expresada en rad/s, (R_{TH}) , es la resistencia equivalente de Thevenin, (X_{TH}) , es la reactancia equivalente de Thevenin y (X_2) , es la reactancia del estator [2].

$$\tau_{arranque} = \frac{3V_{TH}^2 R_2}{\omega_{sinc}[(R_{TH} + R_2)^2 + (X_{TH} + X_2)^2]} \quad (22)$$

En base en estas 4 últimas ecuaciones, resulta factible determinar la curva par velocidad del motor de inducción.

3.4.4.6 Numero de vueltas del bobinado del estator

El número de vueltas del bobinado del estator puede ser determinado mediante la Ecuación 23. Donde (V_T) , es el voltaje nominal de alimentación, (f) , es la frecuencia y (Φ) , es el flujo magnético.

$$N_s = \frac{V_T}{\sqrt{2} \times \pi \times f \times \Phi} \quad (23)$$

3.4.5 Clases de diseño y normativas

La norma NEMA establece pautas para la construcción y operación de motores de inducción trifásicos en sistemas de corriente alterna. Dentro de esta norma, se definen cuatro categorías principales de diseño (A, B, C y D) que influyen directamente en las características de rendimiento de estos motores. Estas categorías, designadas con letras, describen aspectos como el par de rotor bloqueado, el par de ruptura, la corriente de rotor bloqueado y el deslizamiento a plena carga [2], [8].

La IEC (Comisión Electrotécnica Internacional) desempeña un papel fundamental en la elaboración de estándares para motores de inducción trifásicos. A través de normas como la IEC 60034-2-1 y el esquema de clasificación IEC 60034-30-1 [6], la IEC establece niveles de eficiencia para estos motores, que van desde IE1, hasta IE4 [1]. Además, regula valores mínimos de par de ruptura, par de arranque y corriente de arranque máxima, según la norma IEC 60034-12 de acuerdo con la IEC 60034-1, que establece parámetros para ocho diseños de rendimiento de arranque [45],[46]. Todas estas normas son aplicables a nivel internacional y abarcan todas las máquinas eléctricas rotativas, excepto vehículos ferroviarios y de carretera [46].

En este contexto, el motor utilizado durante este proyecto se encuentra clasificado con eficiencia IE2, lo que lo identifica como una máquina eléctrica altamente eficiente. Además, se regula acorde a los valores de la norma IEC 60034-1. Por lo que, como parte de la investigación, se validó el diseño del prototipo a través del análisis de las curvas características, las cuales se generaron a partir de los parámetros de su circuito equivalente. Esta validación permitió comparar el rendimiento del motor diseñado convencionalmente con barras de aluminio con el prototipo del motor al utilizar barras de cobre.

CAPÍTULO IV

Resultados y discusión

Este capítulo detalla los resultados obtenidos del análisis del motor de inducción trifásico convencional tipo jaula de ardilla y el prototipo de motor de inducción trifásico jaula de ardilla equipado con barras de cobre.

Se da a conocer el resultado de la implementación del prototipo y el efecto que ocasiona el uso de barras de cobre en el rotor de la MI a las características de funcionamiento en comparación con su estado inicial al utilizar barras de aluminio. El estudio se fundamenta en las metodologías descritas previamente, donde se analizan los parámetros del circuito equivalente, basados en mediciones de voltaje, corriente y potencia durante las pruebas de funcionamiento. Además, se profundiza en el estudio de las curvas características de la MI, como la relación par velocidad y la corriente de arranque, utilizando herramientas computacionales como MATLAB y SIMULINK. Además, se presenta la distribución del flujo eléctrico y magnético de los modelos estudiados en el software FEMM con la finalidad de analizar el comportamiento dinámico de las MI.

Mediante un enfoque que integra aspectos teóricos y experimentales, este estudio determina las propiedades de la máquina de inducción tras la sustitución del material conductor de las barras del rotor de aluminio por cobre.

Finalmente se presenta una discusión de la comparación entre el estado inicial y final de la máquina, analizando las ventajas y desventajas con un énfasis en la factibilidad del proyecto.

4.1 Implementación del prototipo de la MI de jaula de ardilla con barras de cobre

Se realizó el desmontaje de cada una de las partes del motor para extraer el rotor jaula de ardilla, con la finalidad de realizar los trabajos requeridos para reemplazar las barras y anillos de

cortocircuito de aluminio por cobre. La Figura 13, presenta el motor de inducción de jaula de ardilla junto a todas las partes desmontadas, durante dicho proceso.



Figura 13. Desmontaje del motor trifásico jaula de ardilla.

También, se extrajo los rodamientos del eje empleando un extractor de tres patas, conocido como Santiago, herramienta que facilita dicho proceso, garantizando la integridad de los mismos.

Para reemplazar los anillos de cortocircuito y las barras del rotor de jaula de ardilla, inicialmente se retiró los anillos de cortocircuito de aluminio en un torno, como se muestra en la Figura 14. Este procedimiento conto con la ayuda de personal experimentado para desbastar el aluminio con precisión, asegurando su completa eliminación sin alterar el núcleo de las láminas ferromagnéticas del rotor.



Figura 14. Retiro de los anillos de cortocircuito del rotor.

Posteriormente, se realizaron perforaciones longitudinales con un taladro en cada ranura de las barras conductoras de aluminio, utilizando brocas metálicas de 3/32", 5/64" y 1/16". El resultado de este proceso se ilustra en la Figura 15.

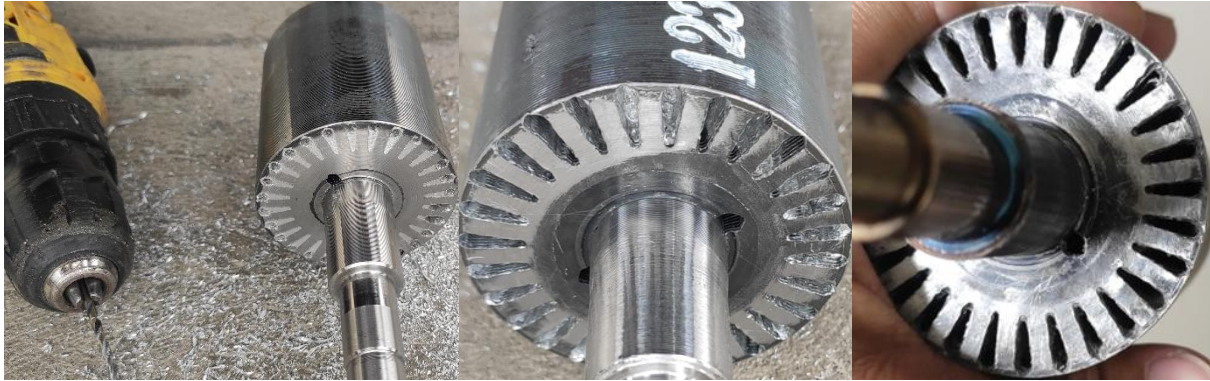


Figura 15. Ranuras de las barras conductoras del rotor.

En las ranuras de las barras del rotor jaula de ardilla, se observa la persistencia de una cantidad mínima de aluminio que no pudo ser retirada completamente, atribuyéndose esto a dos razones principales. El uso invasivo de las brocas ocasionaba daños en el empaquetado de las chapas ferromagnéticas del rotor, despegándolas o perforándolas externamente. Además, las perforaciones adoptaron un enfoque más artesanal que profesional debido al tamaño de las barras y a las dimensiones específicas de las brocas necesarias.

Para las barras conductoras del rotor, se optó por emplear conductor de cobre sólido de calibre 8 AWG y 10 AWG. Estos fueron insertados en cada una de las ranuras del rotor con el propósito de emular el comportamiento de las barras conductoras del mismo.

El cable sólido de calibre 8 AWG se posicionó en los extremos exteriores de las ranuras, a nivel de las chapas del rotor, evitando excesos para no interferir en la fundición de los anillos de cortocircuito. Esto minimiza la formación de grietas y asegura la correcta adherencia del cobre a la base de metal de las chapas del rotor. Por otro lado, el cable sólido de calibre 10 AWG se modeló con pequeños golpes para adoptar una forma rectangular, maximizando la superficie de contacto

en las ranuras de las barras. Se dejó un pequeño exceso de 0,7 cm en los extremos para sostener los anillos de cortocircuito, como se evidencia a continuación en la Figura 16.

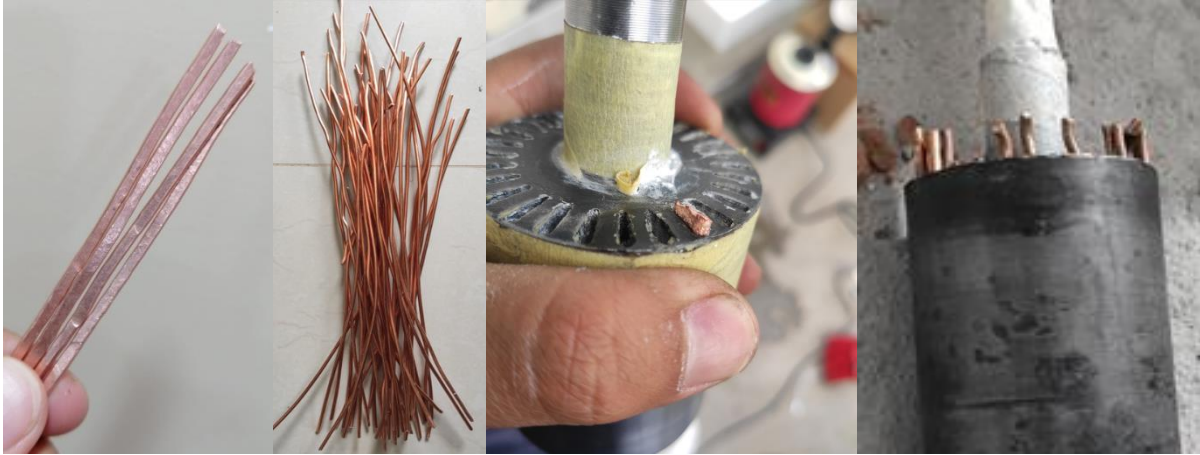


Figura 16. Barras de cobre del rotor jaula de ardilla.

Se fabricaron moldes a partir de plancha galvanizada para construir los anillos de cortocircuito de cobre. Este material fue elegido por su resistencia térmica y flexibilidad, lo que facilitó recrear con precisión las dimensiones originales de los anillos. Estas medidas específicas cuentan con un diámetro externo de 6 cm y uno interno de 3.1 cm. La Figura 17, ilustra los moldes utilizados para dar forma a los anillos de cortocircuito de cobre.



Figura 17. Moldes de los anillos de cortocircuito.

Para el proceso de fundición del cobre, se utilizó cobre de un conductor sólido desnudo de calibre 1/0 AWG. Este fue deshilachado y cortado en pequeños fragmentos, optimizando el proceso de fundición. Como se evidencia en la Figura 18, esta técnica asegura una fusión más eficiente y un

uso adecuado del crisol, conforme a las especificaciones del fabricante mejorando la eficiencia térmica y garantizando un efecto de fusión ideal.



Figura 18. Deshilachado y colocación del cobre en el crisol.

El horno de fundición de metales fue alimentado con una tensión de 110V y se ajustó a una temperatura de 1083 °C, detalle que se puede apreciar en la Figura 19. Además, el cobre fue introducido en el crisol en al instante en el que se estableció la temperatura del horno, con el propósito de aprovechar óptimamente la fase de precalentamiento, facilitando así el alcance de la temperatura requerida para la fusión del material.



Figura 19. Ajuste de temperatura en el horno fundidor.

Se aplicó una fina capa de pasta para soldar y talco a los moldes, como se aprecia en la Figura 20. Este procedimiento evito la adherencia del cobre a los moldes, facilitando así una distribución más uniforme del material durante el proceso de fundición.



Figura 20. Preparación de los moldes.

Se realizo con suma precisión el proceso de fundición de los anillos extremos de cortocircuito en el rotor. La fundición se realizó utilizando cobre fundido de manera rápida con el objetivo de evitar la oxidación del cobre que da lugar a la formación de una capa superficial negra no conductiva. Es importante destacar que los anillos fueron fundidos de manera individual para evitar una concentración excesiva de calor en el núcleo del rotor, lo que podría haber alterado el empaquetado del núcleo. La Figura 21 ilustra el proceso de fundición del primer anillo de cortocircuito.

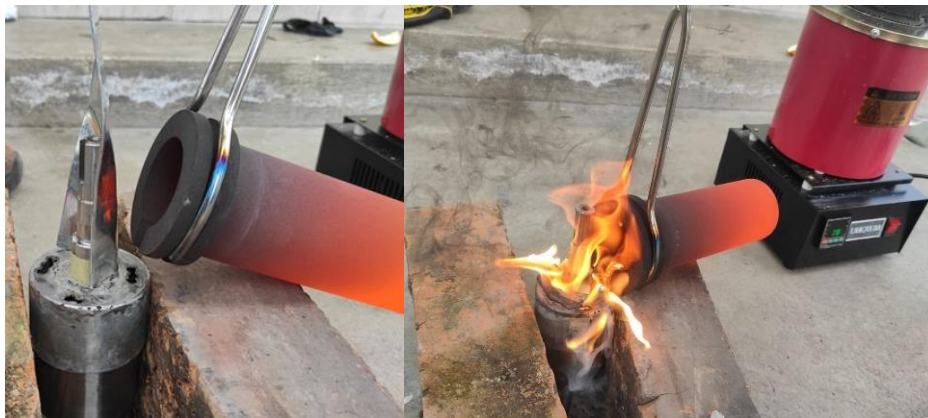


Figura 21. Fundición del primer anillo de cortocircuito.

El rotor se dejó enfriar a temperatura ambiente, y se pulió cuidadosamente la superficie del cobre para eliminar el exceso de material y retirar el molde utilizado durante la fundición del primer anillo de cortocircuito. El resultado obtenido se ilustra en la siguiente Figura.



Figura 22. Resultado del primer anillo de cortocircuito.

El segundo anillo de cortocircuito se fundió con un molde diferente, como se ilustra en la Figura 23, para evitar los inconvenientes experimentados durante el retiro del molde utilizado anteriormente. Se empleó un tubo galvanizado de 1 ¼” para el núcleo y otro de 2 ½” para el exterior del anillo. Dicho material, fue preparado para la fundición de manera similar al molde anterior, utilizando pasta para soldar y talco.



Figura 23. Fundición del segundo anillo de cortocircuito.

La Figura 24 presenta el resultado del rotor jaula de ardilla, obtenido mediante la incorporación de conductores sólidos de cobre en las barras del rotor y la fundición de cobre en los anillos de cortocircuito del rotor.



Figura 24. Resultado obtenido de la fundición del cobre en el rotor.

Con el objetivo de replicar la forma y el acabado de los anillos de cortocircuito originales de aluminio, y lograr una superficie más uniforme en los mismos, se llevó a cabo el pulido de estos en el torno. Este proceso se realizó en base a las dimensiones iniciales de los anillos de cortocircuito de aluminio, evitando de esta manera el desbalance del rotor. La Figura 25, ilustra el resultado del final rotor.

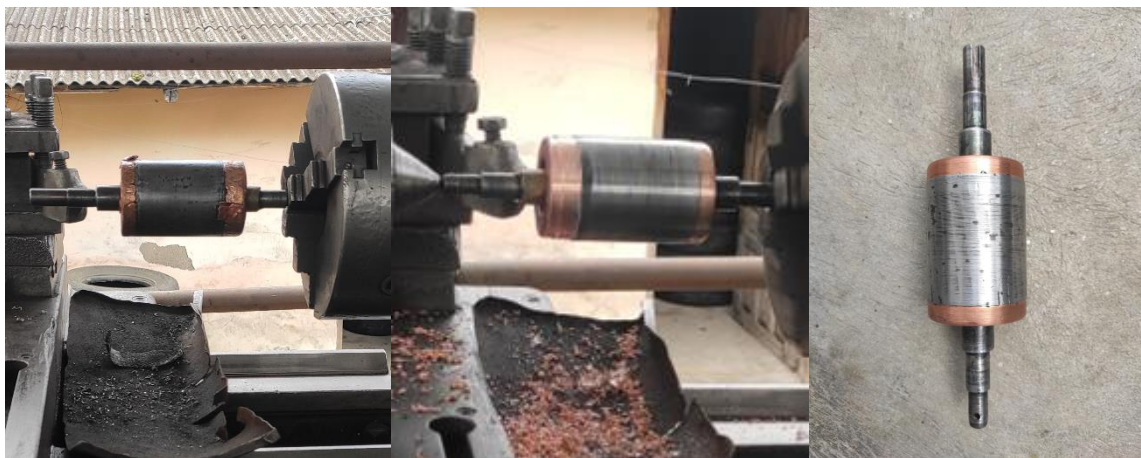


Figura 25. Pulido del cobre en el rotor jaula de ardilla.

Se aplicó una capa de barniz transparente de la marca Evans al rotor, tal como se ilustra en la Figura 26. Este procedimiento se llevó a cabo con el objetivo de proporcionar protección contra la corrosión y garantizar un aislamiento eléctrico adecuado para el rotor.



Figura 26. Barnizado del rotor jaula de ardilla.

Culminadas las labores en el rotor, se llevó a cabo el reensamblado del motor de inducción. Este proceso inicio con la colocación de los rodamientos en el eje del rotor, haciendo uso de una punta metálica y un martillo para golpear con precisión en el aro interno de cada rodamiento, hasta fijarlo en su posición original. Luego, se colocó la tapa posterior para fijar el ventilador del rotor junto a su seguro. Dichas actividades se evidencian en la siguiente Figura.



Figura 27. Colocación de los rodamientos y el ventilador de la MI.

Finalmente, el rotor se introdujo en el estator, y se instaló la tapa delantera de la MI. El resultado de este procedimiento se ilustra en la Figura 28.



Figura 28. Ensamblado del motor de inducción jaula de ardilla con barras de cobre.

De esta manera, se concluyó con la implementación del prototipo de motor de inducción jaula de ardilla con barras conductoras y anillos de cortocircuito de cobre. Además, el motor fue sometido a pruebas de funcionamiento idénticas a las aplicadas en la MI convencional, así como a pruebas de aislamiento DAR (Relación de Absorción Dieléctrica) que consiste en evaluar la resistencia y la calidad del aislamiento interno dentro del motor, en tiempos de 60 y 30 segundos con la finalidad de detectar posibles inconvenientes en el prototipo que comprometerían la seguridad del motor durante su funcionamiento.

Mediante este proceso se determinaron las variaciones entre el prototipo y el motor de inducción estándar, atribuidas al uso del aluminio y el cobre en el rotor de jaula de ardilla. La evaluación se fundamentó en el análisis de circuitos equivalentes, el examen de curvas características y simulaciones de elementos finitos mediante el software FEMM, enfocadas en la densidad del flujo magnético y de corriente eléctrica. Los hallazgos detallados de estos estudios se exponen en los siguientes puntos.

4.2 Pruebas de funcionamiento de la MI convencional y el prototipo

Las pruebas de funcionamiento tanto para el motor de inducción convencional como para el prototipo se efectuaron en el laboratorio de la carrera de Electricidad, de acuerdo con la norma IEEE 112 y manteniendo idénticas condiciones para ambas máquinas. Estas incluyeron la prueba de corriente continua, en vacío y de rotor bloqueado, en base a los esquemas de conexión previamente detallados en el capítulo anterior. Es importante destacar que, para el prototipo, fue necesario ajustar las variables eléctricas de entrada debido a cambios significativos en sus características físicas. A continuación, se exponen los resultados obtenidos para cada motor.

4.2.1 Resultados de las pruebas de funcionamiento de la MI convencional

Para establecer una referencia de rendimiento, se ejecutaron pruebas de funcionamiento en la MI convencional, como se evidencia en la Figura 29. Este procedimiento inicial fue crucial para validar el desempeño bajo condiciones estandarizadas y para caracterizar parámetros operativos como la corriente y la potencia eléctrica del motor, que posteriormente sirvieron como base de comparación con el prototipo desarrollado.



Figura 29. Pruebas de funcionamiento de la MI convencional.

Los resultados obtenidos de las pruebas de funcionamiento, aplicadas al motor de inducción tipo jaula de ardilla convencional con barras de aluminio, se detallan en la Tabla 6.

Tabla 6

Resultados de las pruebas de funcionamiento de la MI convencional

Prueba DC	Prueba de vacío			Prueba de rotor bloqueado		
Resistencia R1	LINEA	Voltaje AC	Corriente AC	LINEA	Voltaje AC	Corriente AC
12,16 Ω	1-2	224,7V	1,35A	1	37V	1,87A
	2-3	223,1V	1,39A	2	37V	1,87A
	1-3	221,2V	1,34A	3	36,9V	1,87A
	Promedio	223V	1,36A	Promedio	36,96V	1,87A
	<i>f</i>	60Hz		<i>f</i>	60Hz	

La prueba DC no presenta valores de voltaje y corriente en DC debido a un inconveniente en las fuentes del laboratorio de la carrera de Electricidad durante la ejecución de la prueba. En consecuencia, se determinó directamente el valor de la resistencia del estator R_1 , empleando un medidor de resistencia de aislamiento de la marca Fluke 1507. Además, la norma IEEE 112 especifica que la prueba de rotor bloqueado debe realizarse a diferentes frecuencias. Sin embargo, debido a limitaciones en los equipos de los laboratorios de la carrera de Electricidad y la falta de un sistema de regulación de voltaje y frecuencia trifásico, se llevó a cabo una prueba a 60 Hz utilizando autotransformadores regulables de 1 kVA.

4.2.2 Resultados de las pruebas de funcionamiento del prototipo

El prototipo se sometió a pruebas de funcionamiento que replicaron las condiciones de la máquina eléctrica convencional con el objetivo de evaluar su rendimiento, como se evidencia en la Figura 30. Cabe mencionar que esta máquina no se sometió a la prueba en corriente directa (DC), debido a que la resistencia del estator R_1 es la misma que el caso anterior.

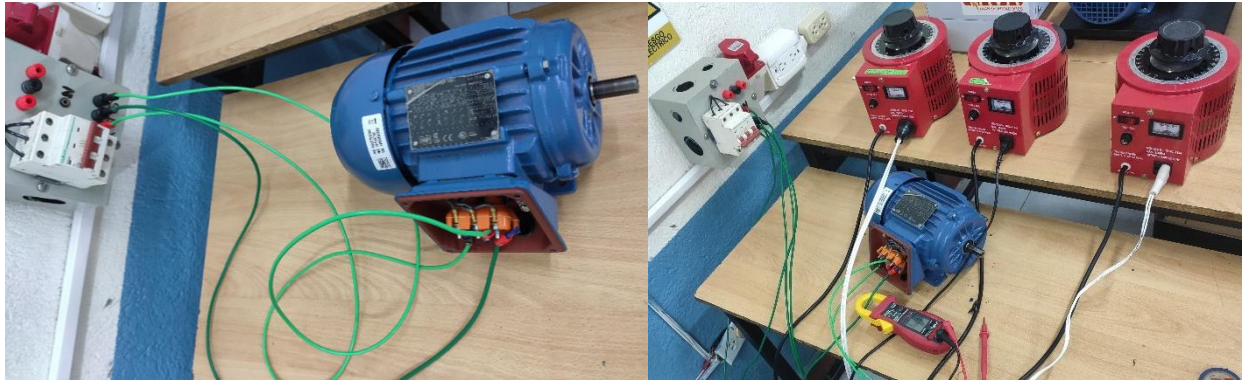


Figura 30. Pruebas de funcionamiento del prototipo.

En una primera fase de evaluación, se ajustó el voltaje de entrada del prototipo a sus valores nominales. Esto facilitó el análisis de los resultados obtenidos y la comprensión del comportamiento del prototipo en comparación con la máquina convencional. Los resultados de esta fase se presentan a continuación en la siguiente tabla.

Tabla 7

Resultados de las pruebas de funcionamiento del prototipo

Prueba DC	Prueba de vacío			Prueba de rotor bloqueado		
	LINEA	Voltaje AC	Corriente AC	LINEA	Voltaje AC	Corriente AC
Resistencia R1 12,16 Ω	1-2	224,6V	1,47A	1	91,8V	1,87A
	2-3	222,9V	1,46A	2	91,5V	1,87A
	1-3	222,6V	1,48A	3	91,7V	1,87A
	Promedio	223V	1,47A	Promedio	91,6V	1,87A
	<i>f</i>	60Hz		<i>f</i>	60Hz	

Al mantener el voltaje nominal de entrada en la prueba de vacío en el prototipo, se observó un leve aumento de corriente de 0,11 A. Este incremento se atribuye a la mayor masa del rotor jaula de ardilla de cobre en comparación con la jaula de aluminio.

Por otra parte, el voltaje necesario para alcanzar la corriente nominal establecida en la placa de características de la MI en rotor bloqueado, aumento significativamente en 54,84V con respecto a su estado inicial al utilizar aluminio. Este cambio se debe a que las características físicas de la MI

cambiaron por completo en el prototipo por lo que se realizaron diferentes pruebas de funcionamiento con la finalidad de evaluar el comportamiento del prototipo en función a diferentes voltajes de entrada, haciendo uso de autotransformadores regulables de 1kVA. Los resultados detallados de estas pruebas se presentan en el Anexo B.

En este sentido, se realizó una prueba incrementando el voltaje de entrada de la maquina tanto en condiciones de vacío como en rotor bloqueado, con el propósito de alinear las características de la curva par velocidad del prototipo con la curva original. El resultado, presentado en la Tabla 8, fue obtenido tras una serie de pruebas experimentales realizadas en el prototipo.

Tabla 8

Resultados del prototipo con variables eléctricas de entrada corregidas

Prueba DC	Prueba de vacío			Prueba de rotor bloqueado		
Resistencia R1	LINEA	Voltaje AC	Corriente AC	LINEA	Voltaje AC	Corriente AC
12,16 Ω	1-2	270,8V	2,23A	1	113,2V	2,39A
	2-3	269,5V	2,35A	2	113V	2,39A
	1-3	269,2V	2,29A	3	113,1V	2,39A
	Promedio	269,93V	2,29A	Promedio	113,1V	2,39A
	<i>f</i>	60Hz		<i>f</i>	60Hz	

El voltaje de entrada de la máquina se ajustó utilizando autotransformadores regulables de 1KVA.

Cabe destacar que en las pruebas realizadas no se tuvo en cuenta la corriente nominal de la máquina, ya que las características físicas del prototipo difirieron significativamente de las características iniciales de la máquina.

4.2.2.1 Pruebas de resistencia y aislamiento del prototipo

Las pruebas de resistencia y aislamiento realizadas en el prototipo se realizaron haciendo uso de un comprobador de resistencia de aislamiento de la marca Fluke modelo 1507, con el cual se verifico la integridad del sistema de bobinado y se evaluó la calidad de resistencia y aislamiento

del estator de la MI posterior a las pruebas de funcionamiento. Estas pruebas, incluyeron la medición de la resistencia entre bobinas, la evaluación del aislamiento con respecto a tierra y la prueba DAR (Relación de Absorción Dieléctrica), para garantizar la fiabilidad y seguridad operativa del motor, identificando posibles debilidades en el aislamiento ocasionadas durante el funcionamiento de la máquina.

Durante la prueba de resistencia entre las bobinas del estator se obtuvieron los resultados presentados en la Tabla 9.

Tabla 9

Prueba de resistencia entre bobinas del estator del prototipo

Bobina	Valor (ohm)
3	18,51Ω
2	18,79Ω
1	18,48Ω

El resultado obtenido, resalta la uniformidad en las bobinas del estator, indicando un equilibrio adecuado en la carga generada. Mientras que, en la prueba de aislamiento del bobinado del estator con respecto a tierra, se realizó la medición de aislamiento de las 3 bobinas con respecto a la carcasa a 500V, que es el doble del voltaje nominal de operación de la maquina conectada en delta. Se obtuvo un valor de 550 MΩ en las 3 bobinas, como se evidencia en la siguiente figura.

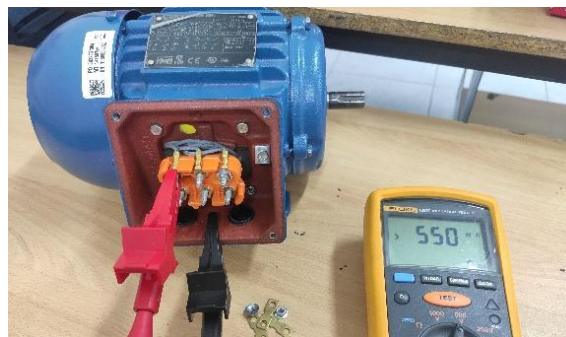


Figura 31. Prueba de aislamiento del bobinado del estator respecto a tierra.

El resultado destaca una resistencia dieléctrica muy alta del bobinado del estator, lo cual evidencia que el aislamiento del motor es efectivo y que la fuga de corriente hacia tierra es casi nula, por lo que el riesgo de cortocircuito o fallos relacionados con el aislamiento es mínimo.

Por otra parte, durante la prueba DAR, se observó un mensaje de error en la pantalla del comprobador de resistencia de aislamiento, como se evidencia en la Figura 32.



Figura 32. Prueba DAR del prototipo.

Este resultado indica un buen aislamiento de la máquina, ya que el valor al ser tan pequeño no puede ser registrado por el equipo. Esto sugiere que no hay presencia de humedad ni contaminantes que puedan afectar la resistencia dieléctrica del bobinado a largo plazo. Por lo tanto, el equipo no presenta ningún valor medible.

4.2.3 Deslizamiento y frecuencia del rotor de la MI convencional y el prototipo

El deslizamiento del motor de inducción jaula de ardilla se determinó mediante la Ecuación 1, considerando una velocidad nominal de 1700 RPM detallada en la placa del motor y la síncrona de 1800 RPM, obteniendo así el siguiente resultado.

$$S_1 = 0,055 \approx 5,55\%$$

Mediante la Ecuación 2, se determinó la frecuencia del rotor donde se consideró la frecuencia de 60 Hz del sistema de alimentación.

$$f_{r1} = 3,3 \text{ Hz}$$

Por otra parte, para determinar el deslizamiento del prototipo se consideró la velocidad nominal de 1760 RPM, dato obtenido durante la prueba de funcionamiento con ayuda de un tacómetro evidenciado en el Anexo F, considerando la velocidad síncrona de 1800RPM.

$$S_2 = 0,021 \approx 2,1\%$$

Mientras que la frecuencia del rotor del prototipo, considerando su deslizamiento y la frecuencia de 60 Hz del sistema, resultó en lo siguiente.

$$f_{r2} = 1,3 \text{ Hz}$$

La disminución del deslizamiento y de la frecuencia en el rotor del prototipo son los resultados observados después de reemplazar la jaula de ardilla de aluminio por una de cobre. Estos cambios demuestran una leve mejora en la eficiencia del prototipo, representando menores pérdidas mecánicas debido a la mayor transferencia de corriente en las barras del rotor y mayor velocidad mecánica del mismo.

4.2.4 Calculo de los parámetros del circuito equivalente de la MI convencional

A partir de los datos recopilados en las pruebas de funcionamiento de la MI, y aplicando las ecuaciones matemáticas pertinentes, se lograron los resultados siguientes.

Utilizando la Ecuación 3, se calculó el voltaje de fase del sistema, tomando como base el voltaje de línea de 223V, lo que resultó en lo siguiente.

$$V_\phi = 128,74 \text{ V}$$

La potencia de entrada del motor en condiciones de vacío se determina mediante la Ecuación 4; sin embargo, en este caso, se obtuvo directamente durante la prueba de funcionamiento de la MI utilizando una pinza de potencia. El resultado se muestra a continuación.

$$P_{entr,sc} = 378,21 \text{ W}$$

De la misma manera, se determinó la potencia de la MI en condiciones de rotor bloqueado.

$$P_{entr, RB} = 86,19 W$$

La resistencia del estator se determina mediante la Ecuación 5. Sin embargo, en este caso se determinó directamente con un medidor de resistencia de aislamiento Fluke 1507, realizando la conexión del bobinado del estator en delta. Mediante el cual se obtuvo el siguiente resultado.

$$R_1 = 12,16 \Omega$$

La impedancia del motor en vacío (Z_{sc}), se determinó mediante la Ecuación 6. Donde el voltaje de fase $V_\phi = 128,74 V$ y la corriente de línea $I_L = 1,36 A$. obteniendo lo siguiente.

$$|Z_{sc}| = 94,66 \Omega$$

Las pérdidas del cobre en el estator las cuales están asociadas con la resistencia eléctrica del conductor de las bobinas se determinan mediante la Ecuación 7. Donde $I = 1,36 A$ y $R_1 = 12,16 \Omega$.

$$P_{PCE} = 67,47 W$$

Las pérdidas giratorias que afectan al movimiento del rotor se determinaron mediante la Ecuación 8. Donde $P_{ent} = 378,21 W$ y las pérdidas $P_{CE} = 67,47 W$.

$$P_{rot} = 310,74 W$$

La impedancia del rotor bloqueado se determinó mediante la Ecuación 9, donde el voltaje total aplicado al estator para alcanzar la corriente nominal del motor fue de 36,96V, considerando la corriente nominal de la máquina.

$$|Z_{RB}| = 11,41 \Omega$$

Se determino el ángulo de la impedancia del rotor bloqueado, aplicando la Ecuación 10. Donde $P_{entr, RB} = 86,19 W$, $V_T = 36,96 V$ y la corriente I_L es la corriente nominal de la máquina.

$$\theta = 44,028^\circ$$

En base a $R_{RB} = 8,20 \Omega$ y $R_1 = 12,16 \Omega$. Se determinó la resistencia del rotor mediante la Ecuación 11.

$$R_2 = 3,96 \Omega$$

Mediante la Ecuación 12, se determinó el valor de la reactancia considerando la frecuencia de 60Hz y el ángulo (θ) de $44,028^\circ$.

$$X'_{RB} = 7,93 \Omega$$

En este caso, $X'_{RB} = X_{RB}$ lo que significa que la reactancia medida durante la prueba es la misma que la reactancia equivalente. Esto se debe a que la prueba de rotor bloqueado se llevó a cabo únicamente a una frecuencia de 60Hz.

La reactancia del estator y el rotor se determinó mediante la Ecuación 14.

$$X_1 = (7,93 \Omega)(0,4) = 3,17 \Omega \quad ; \quad X_2 = (7,93 \Omega)(0,6) = 4,76 \Omega$$

La reactancia de magnetización se determinó mediante la Ecuación 15.

$$X_m = 91,49 \Omega$$

La Tabla 10 presenta los parámetros obtenidos para el circuito equivalente, específicamente para el motor de inducción tipo jaula de ardilla estándar, al utilizar barras de aluminio en el rotor.

Tabla 10

Parámetros del circuito equivalente de la MI convencional

R_1	12,16 Ω
jX_1	3,17 Ω
R_2	3,96 Ω
jX_2	4,76 Ω
jX_m	91,49 Ω

A continuación, en la Figura 33, se presenta el circuito equivalente de la MI.

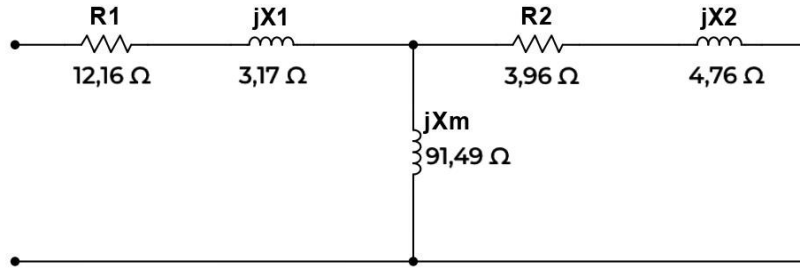


Figura 33. Circuito equivalente de la MI convencional.

4.2.5 Cálculo de los parámetros del circuito equivalente del prototipo

Con base en los datos recopilados durante las pruebas de funcionamiento del prototipo detalladas en la Tabla 7, y aplicando las ecuaciones previamente mencionadas, se obtuvieron los siguientes resultados.

El voltaje de fase del sistema se calculó considerando un voltaje de línea de 223V, dando como resultado lo siguiente.

$$V_{\phi} = 128,74 \text{ V}$$

La potencia de entrada del motor en condiciones de vacío se determinó directamente durante la prueba de funcionamiento del prototipo utilizando una pinza de potencia. El resultado obtenido se muestra a continuación.

$$P_{entr,sc} = 545,23 \text{ W}$$

De la misma manera, se determinó la potencia de la MI en condiciones de rotor bloqueado.

$$P_{entr,RB} = 166,5 \text{ W}$$

La resistencia del estator R_1 se mantuvo en $12,16 \Omega$, debido a que no se realizó ningún tipo de modificación en el mismo.

La impedancia del motor en vacío (Z_{sc}), se determinó mediante la Ecuación 6. Donde el voltaje de fase $V_{\phi} = 128,74 \text{ V}$ y la corriente de línea $I_L = 1,47 \text{ A}$, resultando en lo siguiente.

$$|Z_{sc}| = 87,57 \Omega$$

Las pérdidas del cobre en el estator, se determinó mediante la Ecuación 7. Donde $I = 1,47 A$ y $R_1 = 12,16 \Omega$.

$$P_{PCE} = 78,82 W$$

Las perdidas giratorias, se determinó mediante la Ecuación 8. Donde $P_{ent} = 545,23 W$ y las pérdidas $P_{CE} = 78,82 W$.

$$P_{rot} = 466,41 W$$

La impedancia del rotor bloqueado se determinó mediante la Ecuación 9, donde el voltaje total aplicado al estator para alcanzar la corriente nominal del motor fue de $91,6V$, considerando la corriente nominal de la máquina.

$$|Z_{RB}| = 28,28 \Omega$$

Se determino el ángulo de la impedancia del rotor bloqueado, aplicando la Ecuación 10. Donde $P_{entr,RB} = 166,5 W$, $V_T = 91,6V$ V y la corriente I_L es la corriente nominal de la máquina.

$$\theta = 55,86^\circ$$

En base a $R_{RB} = 28,28 \Omega$ y $R_1 = 12,16 \Omega$. Se determinó la resistencia del rotor mediante la Ecuación 11.

$$R_2 = 3,71 \Omega$$

Mediante la Ecuación 12, se determinó el valor de la reactancia considerando la frecuencia de $60Hz$ y el ángulo (θ) de $55,86^\circ$.

$$X'_{RB} = 23,40 \Omega$$

En este caso, $X'_{RB} = X_{RB}$ lo que significa que la reactancia medida durante la prueba es la misma que la reactancia equivalente. Esto se debe a que la prueba de rotor bloqueado se llevó a cabo únicamente a una frecuencia de $60Hz$.

La reactancia del estator y el rotor se determinó mediante la Ecuación 14.

$$X_1 = (23,40 \Omega)(0,4) = 9,36\Omega \quad ; \quad X_2 = (23,40 \Omega)(0,6) = 14,04 \Omega$$

La reactancia de magnetización se determinó mediante la Ecuación 15.

$$X_m = 78,21 \Omega$$

La Tabla 11 presenta los parámetros obtenidos para el circuito equivalente del prototipo de MI con barras de cobre en base al voltaje nominal de entrada.

Tabla 11

Parámetros del circuito equivalente del prototipo según valores nominales

R_1	12,16 Ω
jX_1	9,36 Ω
R_2	3,71 Ω
jX_2	14,04 Ω
jX_m	78,21 Ω

A continuación, en la Figura 34, se presenta el circuito equivalente del prototipo en base a los valores registrados en la Tabla 7.

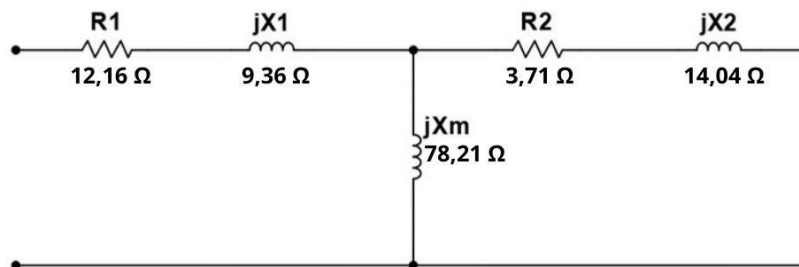


Figura 34. Circuito equivalente del prototipo en base a los valores nominales de la MI.

Por otra parte, al considerar los valores detallados en la Tabla 8, donde las magnitudes de las variables eléctricas, como el voltaje y la corriente, son mayores en las pruebas de vacío y rotor bloqueado, se obtiene el resultado ilustrado a continuación en la Figura 35.

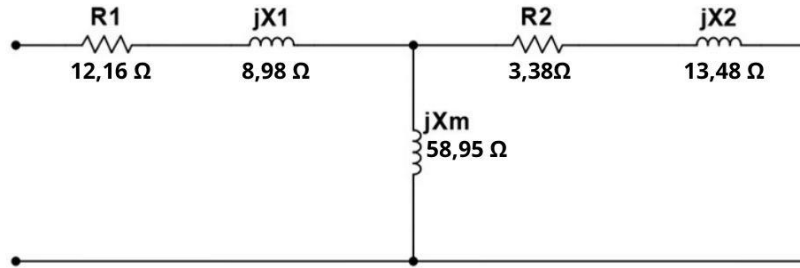


Figura 35. Circuito equivalente del prototipo con variables corregidas.

El circuito equivalente del prototipo, al elevar las variables eléctricas de voltaje y corriente resalta la disminución de la resistencia del rotor R_2 y la reactancia de magnetización jX_m , señalando un aumento en la eficiencia del prototipo. En contraste, las reactancias del estator y del rotor experimentaron un notable incremento. Esta variación resulta beneficiosa, ya que una mayor reactancia del estator jX_1 , contribuye a reducir el torque de arranque, mientras que la reactancia del rotor jX_2 , contribuye a limitar las corrientes en el estado de rotor bloqueado.

4.2.6 Curva par velocidad de la MI convencional y el prototipo

En base al análisis del circuito equivalente, se empleó al teorema de Thévenin para reducir el circuito y determinar la curva de par velocidad del motor de inducción. En la Tabla 12, se presentan los resultados obtenidos del voltaje de Thévenin, así como su resistencia e inductancia, haciendo uso de las ecuaciones 16 y 17.

Tabla 12

Equivalentes de Thévenin de la MI convencional

V_{TH}	121,84 V
R_{TH}	11,189 Ω
X_{TH}	4,406 Ω

A partir de los resultados del equivalente de Thévenin, complementados con los datos del circuito equivalente por fase de la MI, se determinaron características fundamentales del motor utilizando las ecuaciones 19, 20, 21 y 22. Estas incluyen el deslizamiento máximo, la velocidad mecánica en

ese punto, el par de arranque y el torque máximo. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 13, y representan los puntos para la elaboración de la curva característica del motor.

Tabla 13

Parámetros de la curva par velocidad de la MI convencional

Deslizamiento máximo	0,2747
Velocidad mecánica	1305.54 RPM
Torque arranque	3,00912 N.m
Torque máximo	4,627 N.m

La Figura 36 ilustra la curva característica par velocidad del motor de inducción de jaula de ardilla convencional, generada mediante simulación en MATLAB.

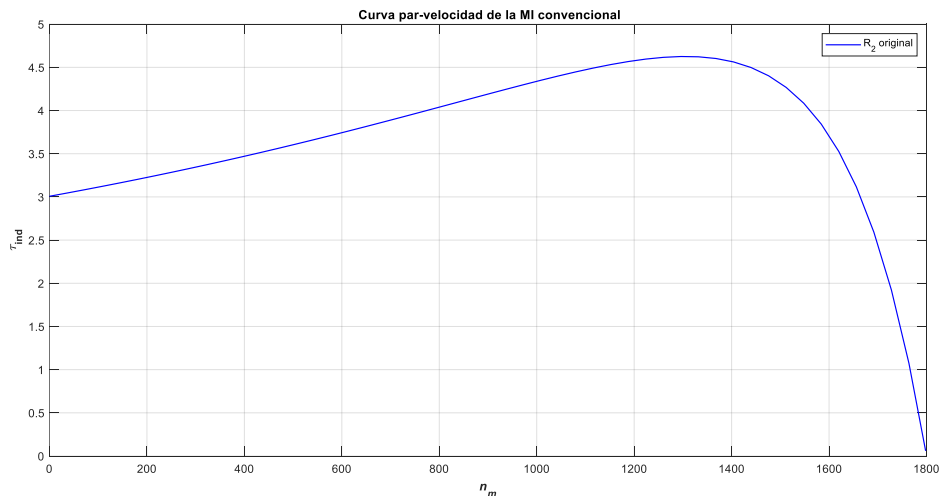


Figura 36. Curva par velocidad de la MI convencional.

La curva par velocidad refleja el comportamiento del motor de inducción convencional, mostrando el torque inducido en $N.m$ con respecto a la velocidad en RPM. El pico de torque ocurre poco antes de la velocidad nominal y disminuye con el aumento de la velocidad, evidenciando el punto cercano a la inestabilidad del motor al alcanzar la velocidad nominal, donde el torque es 0.

Considerando los valores de la Tabla 7, donde se mantuvieron las variables eléctricas nominales de operación de la MI, y aplicando las ecuaciones correspondientes, se calcularon las magnitudes

de voltaje, resistencia e inductancia de Thévenin, en el caso del prototipo. Los resultados se muestran a continuación en la siguiente tabla.

Tabla 14

Equivalentes de Thévenin del prototipo según variables nominales

V_{TH}	114,8 V
R_{TH}	9,547 Ω
X_{TH}	9,691 Ω

Los resultados muestran una disminución en el voltaje y la resistencia de Thévenin, así como un aumento en la reactancia respecto al estado inicial, lo que impacta negativamente en la capacidad operativa del motor al afectar la generación del flujo magnético. Además, se identificaron las características clave del prototipo mediante ecuaciones previas, y los hallazgos, expuestos en la Tabla 15, sirvieron para establecer puntos en su curva de par-velocidad para compararla con la inicial de la MI.

Tabla 15

Parámetros curva par velocidad del prototipo con variables nominales

Deslizamiento máximo	0,14498
Velocidad mecánica	1539.03 RPM
Torque arranque	1,0517 N.m
Torque máximo	2,984 N.m

Se observó una disminución significativa en el torque de arranque y el torque máximo, indicando que la curva par velocidad del prototipo tiende a descender. Esto se evidencia en la Figura 37, donde se compara con la curva inicial de la máquina de inducción.

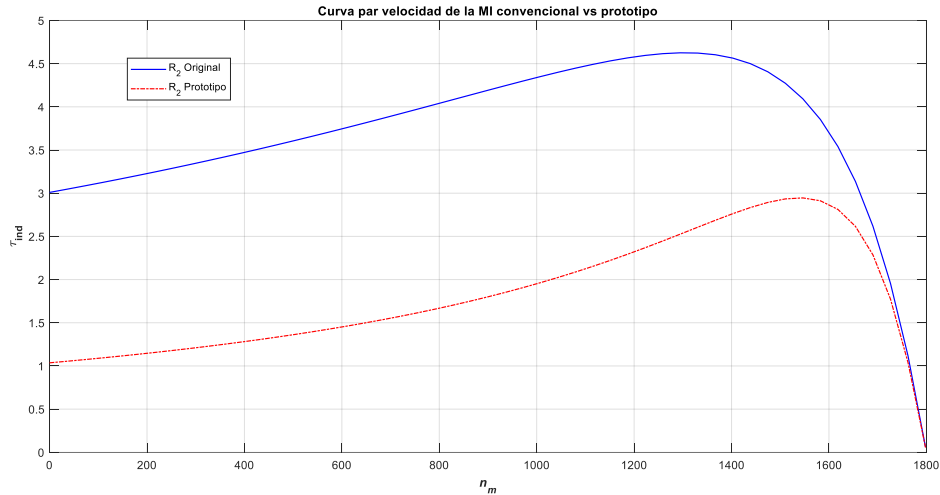


Figura 37. Curva par velocidad del prototipo en base a las variables eléctricas iniciales. La curva del prototipo se sitúa significativamente por debajo del punto de operación en comparación con su estado inicial. Este cambio se atribuye a que las características físicas del prototipo cambiaron en comparación con su estado inicial, aunque con un torque máximo a una velocidad más cercana a la síncrona, pero a su vez muy bajo para arrancar en condiciones de carga. Para corregir esta discrepancia, se ajustaron las variables eléctricas de entrada, como se detalló en la Tabla 8. El objetivo fue acercar la curva del prototipo hacia la curva inicial, ya que tanto el estator como la parte física del rotor fueron diseñados para operar bajo esas condiciones. A continuación, se presentan los resultados del equivalente de Thévenin obtenidos después de implementar dichas correcciones.

Tabla 16

Equivalentes de Thévenin del prototipo con la corrección de las variables

V_{TH}	138,08 V
R_{TH}	8,871 Ω
X_{TH}	9,386 Ω

Al analizar los resultados obtenidos a través de las correcciones aplicadas, el voltaje de Thévenin destaca la capacidad del motor para alcanzar un punto de operación óptimo y generar el flujo

magnético correcto. En la Tabla 17 se presentan los resultados detallados de las características fundamentales del prototipo, basados en la nueva curva par velocidad del prototipo.

Tabla 17

Parámetros corregidos de la curva par velocidad del prototipo

Deslizamiento máximo	0,13801
Velocidad mecánica	1551.58 RPM
Torque arranque	1,52409 N.m
Torque máximo	4,5428 N.m

En base a estos resultados, se realizó la comparación de la curva par velocidad de la MI convencional y del prototipo como se ilustra en la Figura 38.

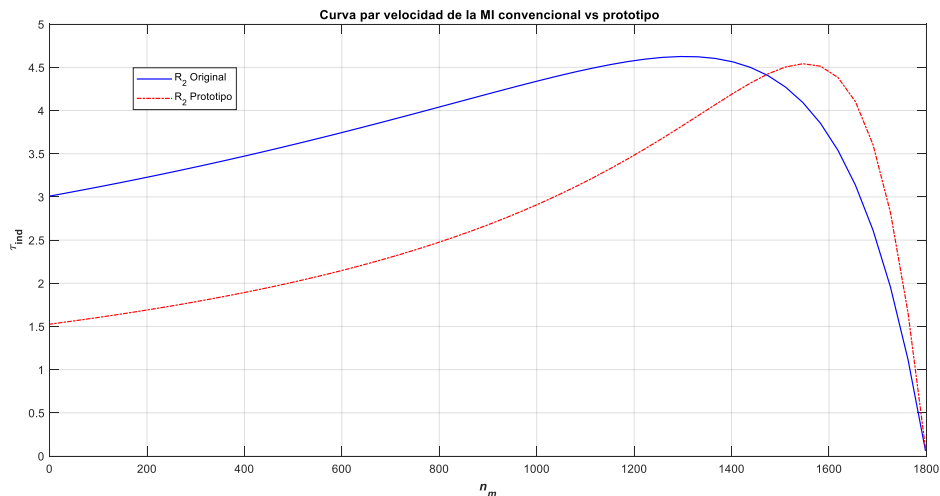


Figura 38. Curva par velocidad del prototipo corregida.

En el gráfico se observa que el rotor del prototipo, con una resistencia R_2 más baja, posibilita que el motor alcance una velocidad operativa superior, llegando a 1765 RPM, mientras presenta un menor torque de arranque. Por otro lado, la máquina de inducción estándar, con una resistencia de rotor más alta, produce un torque de arranque incrementado, pero limita la velocidad pico del motor a 1700 RPM. La alta resistencia de la máquina estándar aumenta el deslizamiento y el torque al arrancar, lo que se traduce en una velocidad operativa más alta en comparación con el prototipo,

aunque obtenida a expensas de un rotor con mayor resistencia y menor reactancia en el estator. Estas diferencias en el comportamiento se deben a la correlación entre el torque y la velocidad en la máquina de inducción y diferencia entre la reactancia del rotor y el estator, así como la de magnetización. Lo que a su vez, se traduce en una eficiencia superior en el prototipo.

4.3 Simulaciones electromagnéticas mediante FEMM

Para el análisis del flujo magnético y la corriente eléctrica del motor de inducción mediante el método de elementos finitos, se utilizó la información especificada en la Tabla 18 que presenta las dimensiones reales de la máquina, medidas en milímetros. Donde se incluye tanto los componentes externos como internos de la máquina.

Tabla 18

Parámetros de la MI para la simulación en FEMM

Parámetro	Medida
Potencia (HP)	0,5
Voltaje nominal (V)	220
Frecuencia (Hz)	60
Polos	4
Velocidad (RPM)	1700
Ranuras Estator	24
Barras Rotor	28
# Vueltas por ranura Estator	33
# Vueltas por ranura Rotor	1
Diámetro Rotor (cm)	6,15
Diámetro interno del Estator (cm)	6,30
Diámetro externo del Estator (cm)	11,0
Diámetro del núcleo - eje (cm)	2,10

La integración de los parámetros geométricos del estator y rotor, así como la selección del material de los materiales constituyentes de la MI y el análisis de los perfiles de intensidad, se efectuó aprovechando los datos adquiridos del modelo de motor de inducción, fundamentados en las especificaciones técnicas del fabricante.

En base a las características y los valores registrados del motor, se realizó la distribución del número de ranuras por polo del estator determinando el paso angular entre cada ranura del estator y de igual manera en el rotor. Se dispusieron 6 ranuras por polo en el estator cada una separada con un ángulo de 15°, mientras que en el rotor las barras se ubicaron con un ángulo de separación de 12,8571°.

Además, mediante la Ecuación 24 se realizó el cálculo del número de vueltas del bobinado del estator por fase, considerando un voltaje nominal de 220V, frecuencia de 60Hz y un flujo magnético de 0,0033.

$$N_{est} = 266 \text{ espiras por fase} \approx 33 \text{ espiras por ranura}$$

Se determino que cada una de las fases consta de 266 espiras, valor que al ser distribuido en las ranuras del estator resulta en 33 espiras distribuidas en cada ranura.

Culminado los cálculos, se desarrolló el diseño de la MI en base a sus dimensiones reales en formato CAD, mismo que se puede visualizar en la Figura 39, en la que se presenta el diagrama del motor y las medidas de sus partes y componentes.

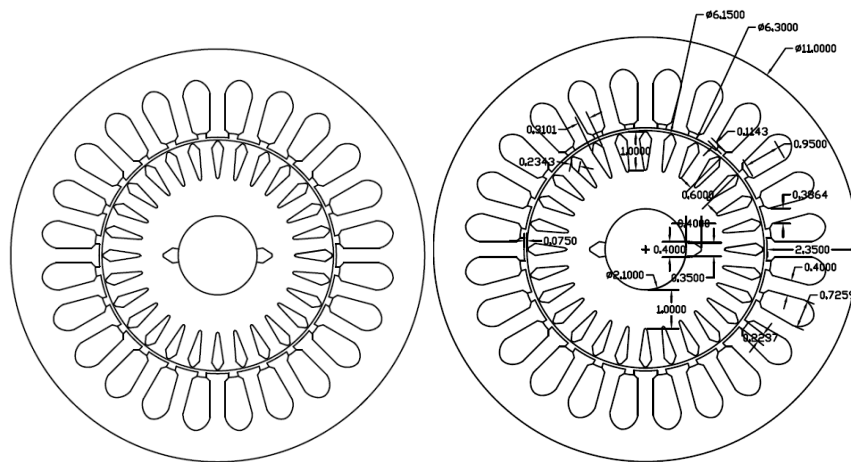


Figura 39. Diagrama esquematizado de la MI en AutoCAD.

El diseño de la MI, se exporto al programa FEMM aprovechando la compatibilidad del formato DXF, que facilita la transferencia de archivos entre ambos programas. Este proceso garantiza una

importación fluida y sin errores y proporciona una interfaz de diseño más dinámica. El diseño completo de la MI en FEMM se presenta en la Figura 40.

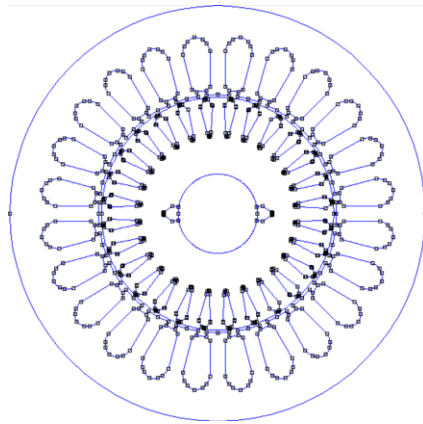


Figura 40. Diseño de la MI en FEMM.

Para el estudio, se seleccionó un problema magnético y se modificaron las unidades del diagrama a centímetros, se ajustó la frecuencia a 0 Hz, así como la profundidad a 13cm, como se ilustra en la Figura 41.

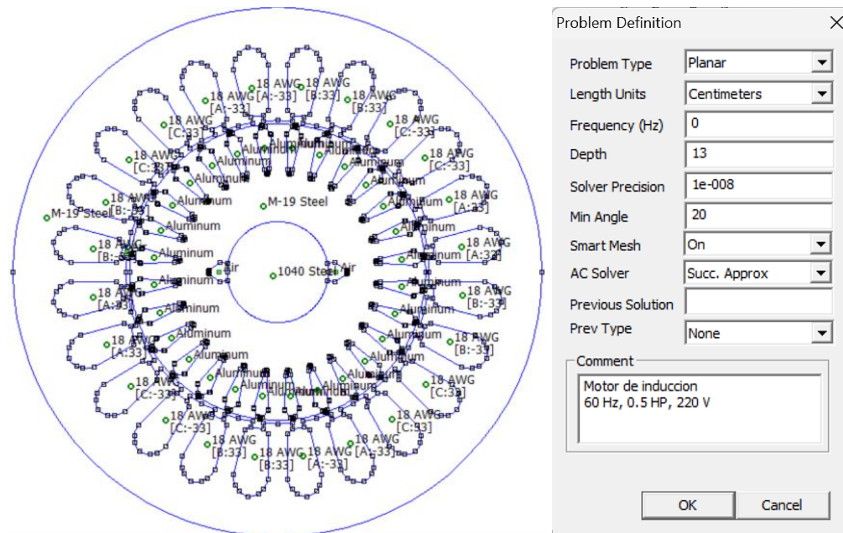


Figura 41. Características del problema en FEMM.

Es importante establecer los parámetros del problema y las especificaciones del motor de inducción antes de iniciar los cálculos y la simulación de elementos finitos del motor.

Las propiedades reflejadas en el gráfico anterior fueron aplicadas igualmente al motor que posee barras de cobre.

4.3.1 Incorporación de los materiales

Definidos los parámetros de simulación en FEMM y desarrollada la estructura del motor de inducción tipo jaula de ardilla, se seleccionó los materiales para cada una de las partes del motor. Esta selección se basó en las propiedades eléctricas y magnéticas específicas de cada material, utilizando la biblioteca integrada de FEMM en base a las características de los materiales del motor. A continuación, se presenta los materiales utilizados para la simulación.

- **Aluminio (Aluminio 1100):** Utilizado en las barras del rotor jaula de ardilla y los anillos de cortocircuito debido a su conductividad eléctrica de 34,45 (MS/m) y su peso ligero.
- **Cobre (Copper 18 AWG, Copper):** Empleado en el bobinado del estator de la MI y en las barras del rotor de jaula de ardilla, supera al aluminio en conductividad eléctrica siendo 58,6 (MS/m) y resistencia mecánica, siendo más elevada.
- **Acero carbono SAE 1040 (1040 Steel):** Material utilizado en la fabricación del eje del rotor jaula de ardilla. Se caracteriza por su resistencia mecánica y ductilidad.
- **Chapas de acero al silicio (M-19 Steel):** Utilizado en la fabricación de las chapas de estator y rotor jaula de ardilla.
- **Aire (Air):** Aplicado en simulaciones para replicar condiciones físicas reales en el rendimiento de la MI.

Cada uno de los puntos y líneas del gráfico contiene un material y un grupo en específico, no se consideró el área de la carcasa dentro del análisis ya que es considerado como un componente mecánico del motor. Para el bobinado del estator se consideró el número de espiras determinado mediante la Ecuación 24. Además, al ser un motor trifásico se distribuyó el bobinado en fases A,

B y C para la distribución trifásica considerando los 4 polos de la MI. La Figura 42 ilustra la distribución de cada uno de los materiales en la MI.

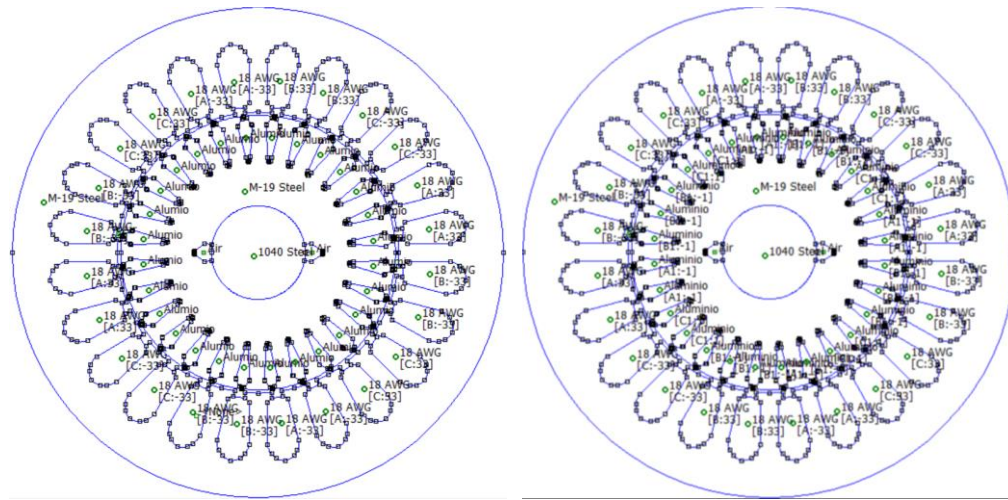


Figura 42. Distribución de los materiales a la MI convencional.

En la MI convencional, se aplicó una corriente de 1.36A, a los circuitos A, B y C del estator. En contraste, en el prototipo se estableció una corriente de 1.47A, teniendo en cuenta las variables eléctricas nominales de entrada. Además, al considerar la corrección de dichas variables, se aplicó una corriente de 2.29A. Estos valores fueron obtenidos durante las pruebas de funcionamiento en vacío de las maquinas eléctricas, evidenciando notables variaciones de corriente entre la MI convencional y el prototipo.

Adicionalmente, se tuvo en cuenta un desfase de 120° , característico de un sistema trifásico, para cada fase del bobinado del estator, distribuido de la siguiente manera: $AA - CC' - BB - AA' - CC - BB' - AA - CC' - BB - AA' - CC - BB'$, considerando los 4 polos de la MI.

De igual forma, esta disposición se extendió a la distribución de las barras del rotor, ajustando la corriente I_2 según la Ecuación 18. Se asignaron corrientes de 1.45A para el rotor con barras de aluminio, 0.61A para el rotor con barras de cobre, basándose en las variables nominales, y 0,81 A al considerar la corrección de las variables eléctricas de entrada.

Se ajustaron las propiedades del contorno al definir el estator como límite, tal como se ilustra en la Figura 43.

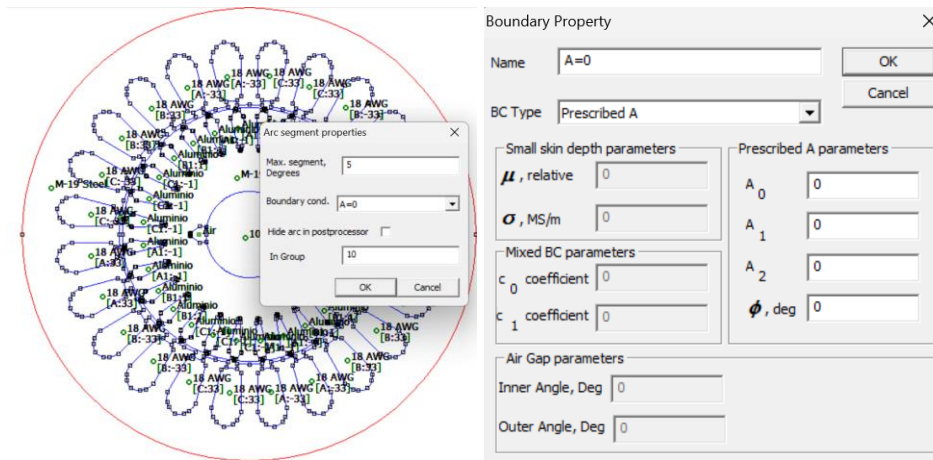


Figura 43. Límite del contorno para la simulación en FEMM.

Con esta configuración, se restringió el cálculo del programa a la sección específica del motor, evitando así extenderse a toda el área de trabajo, resultando en una simulación más rápida y precisa.

4.3.2 Resultados de la simulación en FEMM

Se aseguró que cada componente del modelo del motor de inducción contara con un material específico asignado, previniendo anomalías en la simulación, generando una malla finita de elementos simples, cuyos resultados de compilación se muestran en la Figura 44.

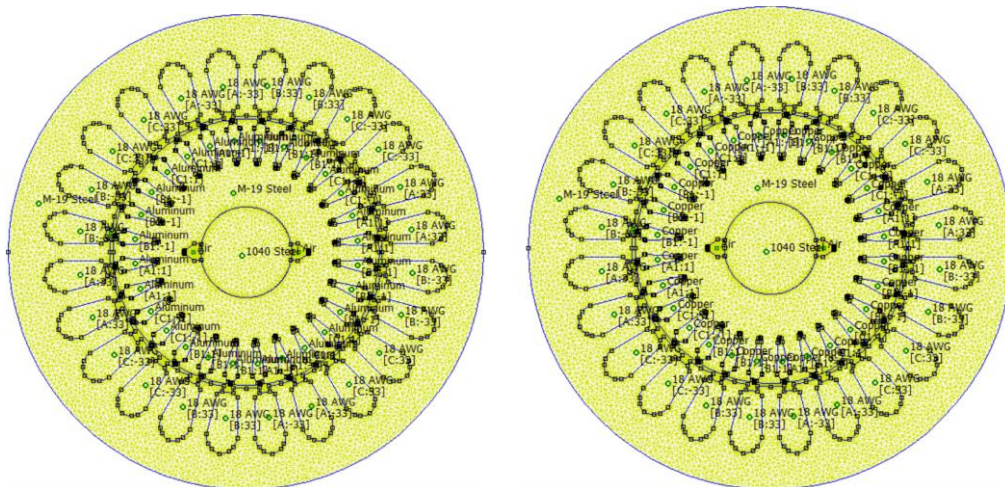


Figura 44. Compilación de malla eléctrica de la MI convencional y el prototipo.

Se ejecutó el programa con una precisión de $1e-008$, valor mínimo necesario para el cálculo de elementos finitos, establecido por defecto en el software. Se tomó en cuenta la profundidad del estator de 13 cm, conforme a la Figura 45 para la solución magnética. La Figura 29 representa la simulación de la MI con la distribución de los 4 polos en las ranuras del estator y las barras del rotor.

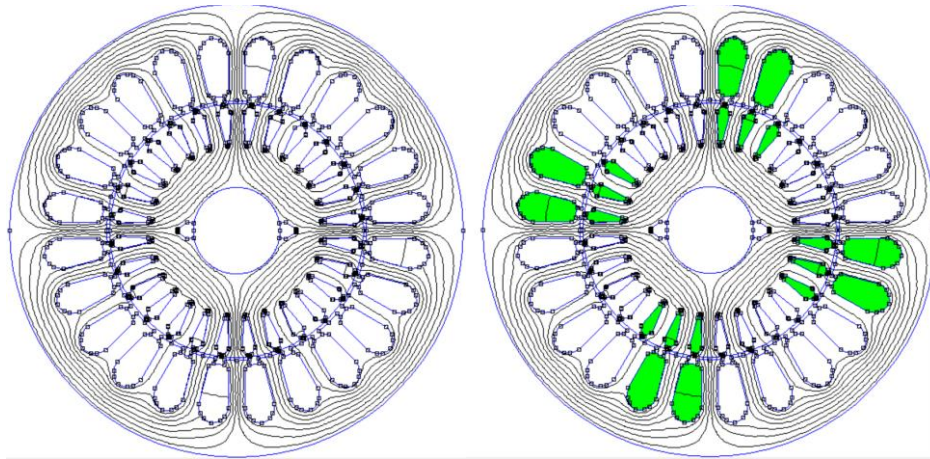


Figura 45. División del circuito del estator y rotor en 4 polos.

La Figura muestra los cuatro polos de la máquina en posición inicial, destacando la división del circuito entre el estator y el rotor. Además, se ilustró también la orientación e intensidad del campo magnético en cada polo, generado por las corrientes de las bobinas, como se detalla en el Anexo C. Este análisis revela el impacto del bobinado del estator en la funcionalidad del motor de inducción, resaltando la importancia del flujo magnético en la generación de torque y la inducción de corriente, junto con la visualización de las pérdidas de flujo magnético a través de flechas radiales desde el estator.

Estas disposiciones son características estándar en los motores de inducción y se mantienen constante en el análisis tanto del motor convencional como del prototipo en esta investigación.

4.3.2.1 Motor de inducción jaula de ardilla con barras de aluminio

El análisis de la MI convencional se llevó a cabo considerando las corrientes previamente mencionadas tanto en el estator como en el rotor. Bajo estas condiciones, se procedió a examinar la densidad de flujo magnético y la densidad de corriente eléctrica. Aunque es posible llevar a cabo la simulación sin considerar la corriente secundaria I_2 del rotor, es importante reconocer que omitirla puede resultar en datos no representativos, ya que esta corriente afecta la dinámica del campo magnético entre el estator y el rotor. Por lo tanto, para obtener resultados precisos y una comparación válida con el prototipo, se debe incluir este valor de corriente.

Bajo estas consideraciones, los resultados de este análisis para el MI tipo jaula de ardilla con barras de aluminio se presentan en las siguientes figuras.

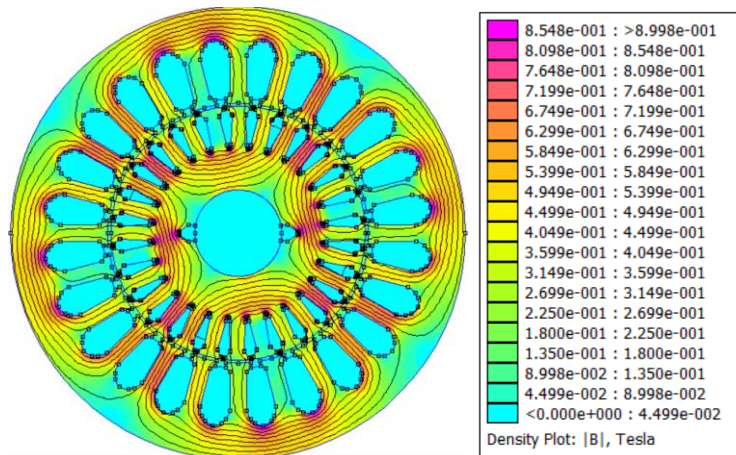


Figura 46. Densidad de flujo magnético de la MI convencional.

En la Figura 46, se muestra la distribución del flujo magnético de la MI convencional, desde el estator al rotor, con valores desde 0 hasta $8.998e-001$ Tesla, evidenciando una modulación eficaz del campo magnético. El gradiente de colores, desde el azul para intensidades más bajas de flujo magnético hasta el rojo para las más altas, confirma la idoneidad del diseño del estator para mantener un campo homogéneo y evitar la saturación magnética, dando a conocer el óptimo funcionamiento de la máquina.

De igual manera, la Figura 47 complementa dichos resultados al ilustrar la curva de densidad del flujo magnético generado por la MI convencional.

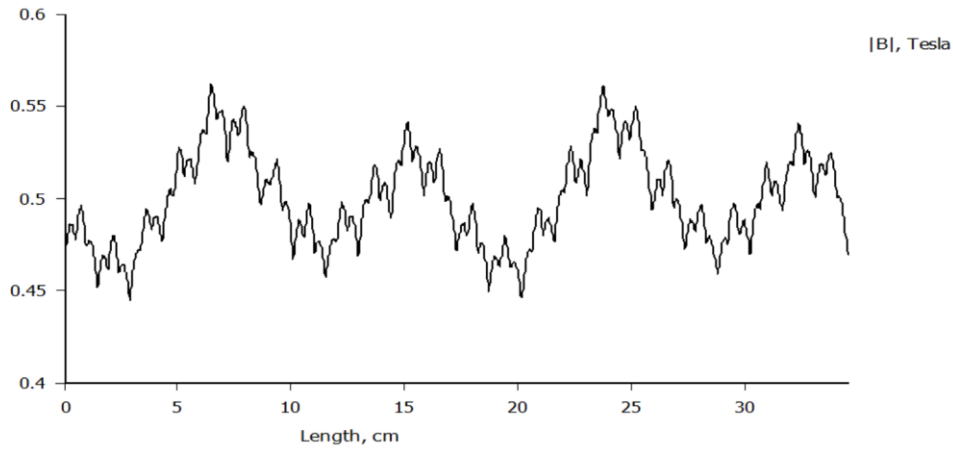


Figura 47. Curva de densidad del flujo magnético de la MI convencional.

Se destacan las fluctuaciones periódicas en la densidad de flujo magnético de la MI, con valores que oscilan entre aproximadamente 0.44 y 0.56 Tesla a lo largo del motor. Estas variaciones son características de la estructura del motor y sugieren que está operando dentro de un rango normal, sin signos de saturación magnética, ya que no supera el valor de 1 Tesla.

Además, se realizó el análisis de la densidad del flujo de la corriente eléctrica, el cual se encuentra ilustrado en la Figura 48.

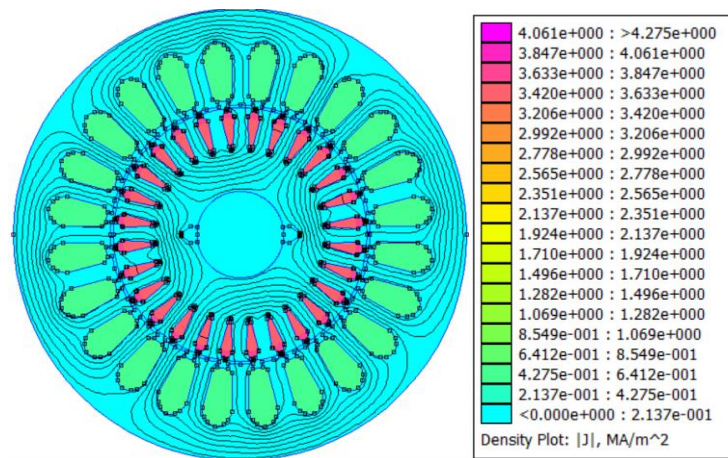


Figura 48. Densidad de corriente eléctrica de la MI convencional.

La densidad de corriente presentada en la Figura 48, es uniforme y simétrica alrededor del rotor. Las regiones de alta densidad de corriente, se alinean adecuadamente con las bobinas del estator, lo que sugiere una correcta alineación y funcionamiento del sistema de inducción. La simetría observada en la disposición de los colores refleja una operación equilibrada y sugiere que las corrientes están bien distribuidas a través del motor. Los valores dentro de la gama de colores están dentro de un rango operativo normal, indicando que no hay anomalías evidentes en la distribución de corriente que podrían conducir a problemas de funcionamiento, aun que las barras del rotor presentan signos de saturación, debido a las características del aluminio como material conductor.

4.3.2.2 Motor de inducción jaula de ardilla con barras de cobre

El análisis del prototipo se efectuó utilizando los datos recabados en las pruebas de funcionamiento y considerando las corrientes secundarias I_2 previamente descritas. Partiendo de las variables eléctricas nominales del motor, se inyectó una corriente de 0.61 A en el rotor con el objetivo de evaluar la densidad de flujo magnético y la corriente eléctrica. Los hallazgos resultantes se presentan a continuación.

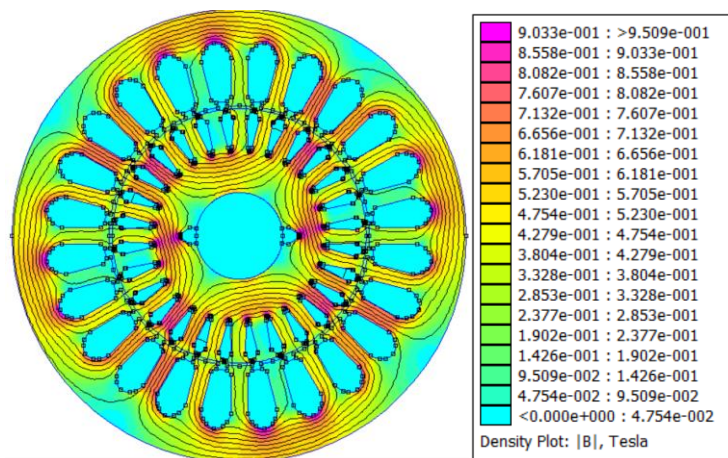


Figura 49. Densidad del flujo magnético del prototipo.

Al comparar la distribución del flujo magnético del prototipo con el motor de inducción convencional, se observan resultados similares. Las áreas de alta densidad destacan una interacción

más intensa entre el campo magnético y las barras de cobre del rotor. El cobre, favorece valores máximos de densidad de flujo ligeramente superiores, alrededor de 0.950 Tesla, comparado con 0.898 Tesla observados en la MI convencional. Esta diferencia se atribuye a la conductividad eléctrica del cobre, que, al disminuir la resistencia al flujo de corriente, incrementa la densidad de flujo magnético en el rotor, lo que a su vez proporciona un campo magnético más eficiente.

De forma complementaria, se generó la curva de densidad de flujo magnético, detallada en la Figura 50, para evaluar las diferencias obtenidas en el prototipo.

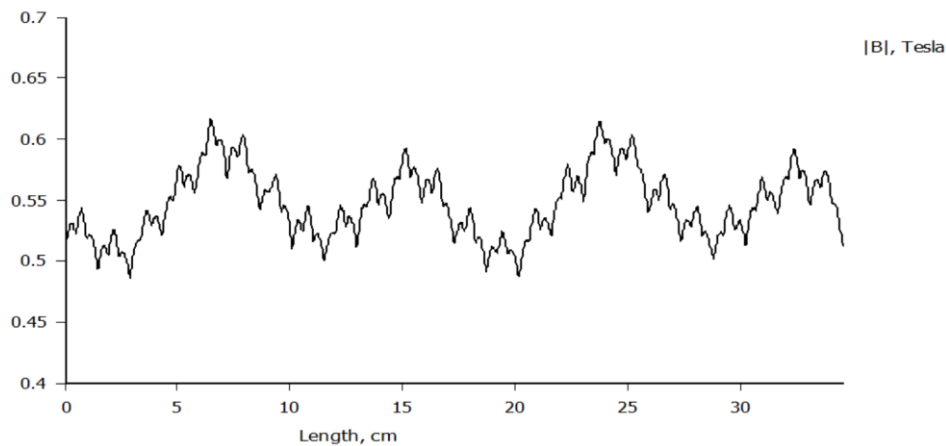


Figura 50. Curva de densidad de flujo magnético del prototipo.

Analizando las Figuras 47 y 50, se observó que el prototipo presenta valores más altos de densidad de flujo magnético en comparación con su estado inicial, lo que indica un campo magnético más intenso, debido a la mayor conductividad del cobre. Aunque las fluctuaciones de las curvas son periódicas y consistentes en ambos casos, la amplitud incrementada en la curva del prototipo sugiere una interacción más eficiente entre el campo magnético y las barras del rotor, lo que se traduce en un rendimiento superior del motor, que a su vez no se encuentra en riesgo de saturación. Del mismo modo, se llevó a cabo el análisis de la densidad de corriente, que se presenta a continuación en la Figura 51. Donde se evidencia que el uso de cobre en el rotor conduce a una mayor densidad de corriente, aprovechando su superior conductividad y su menor resistencia

eléctrica en relación con el aluminio. Esto a su vez, facilita un flujo de corriente más eficiente y reduce la producción de calor, que de igual manera resulta en un mejor rendimiento del motor.

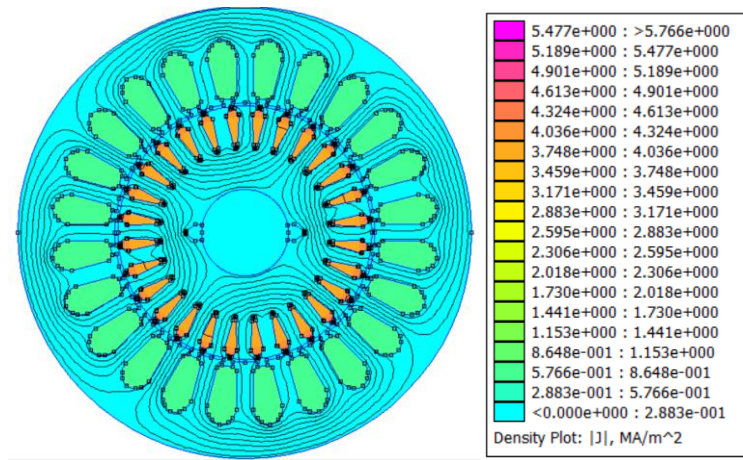


Figura 51. Densidad de corriente eléctrica del prototipo.

En comparación a los datos presentados en la Figura 48. La densidad de corriente en el estator se incrementó de 1,496 a 1,7308 [MA/m²], y en el rotor, de 3,633 a 4,036 [MA/m²]. Destacando una mayor eficiencia en la transferencia de energía, especialmente en las barras de rotor.

Por otra parte, tras ajustar las variables eléctricas de entrada del prototipo, se replicó el análisis aplicando una corriente de 0.81 A en el circuito del rotor. Los resultados obtenidos se detallan a continuación.

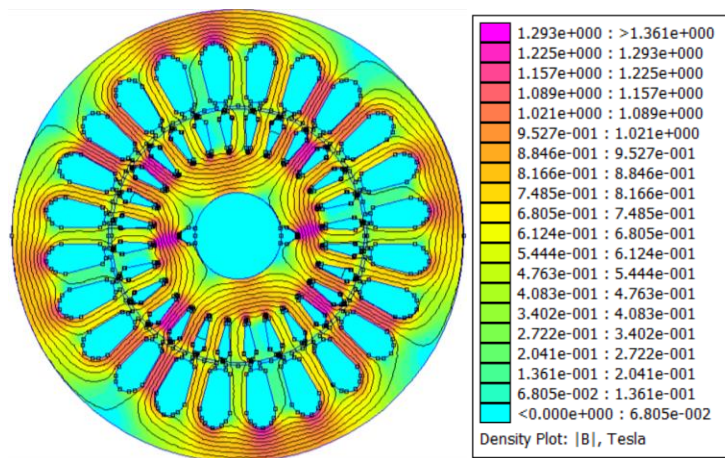


Figura 52. Densidad de flujo magnético del prototipo tras ajustar variables eléctricas.

Los resultados indican que el prototipo de motor de inducción tipo jaula de ardilla, al utilizar barras de cobre, y considerar dichas correcciones, muestra un aumento en la densidad de flujo magnético alcanzando un valor de 1,293 Teslas y corriente eléctrica de 5,837 [MA/m²], superando los resultados obtenidos en comparación al aplicar las variables eléctricas nominales de la Figura 49 y la configuración convencional con barras de aluminio (Figura 46), aunque en este caso el núcleo del rotor y el estator se encuentran en saturación. A pesar de que el aluminio y el cobre muestran comportamientos parecidos, la implementación del cobre mejora los resultados de manera notable debido a que sus propiedades físicas optimizan significativamente el rendimiento de la MI.

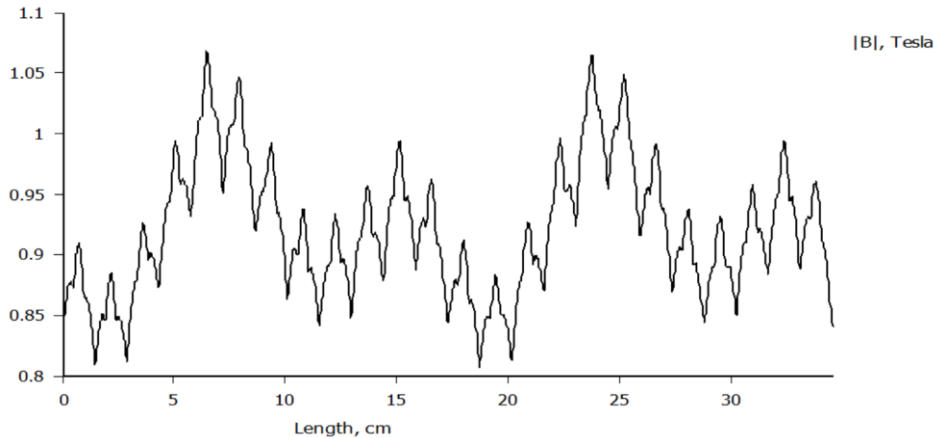


Figura 53. Curva de flujo magnético del prototipo tras ajustar variables eléctricas.

La curva actual en base a las correcciones de las variables de entrada ilustra una densidad de flujo magnético con valores que oscilan entre 0.85 y 1.1 Tesla, lo que sugiere un rango más amplio en comparación con las curvas anteriores. Este incremento se refleja en una mayor respuesta magnética y diferencias en los parámetros físicos y operativos del prototipo en comparación a su estado inicial. Los picos más altos implican, a su vez, una mayor eficacia en la inducción de corriente en el rotor, aunque también representan la saturación del núcleo del estator y el rotor, lo que a su vez sugiere un redimensionamiento de los mismos.

Por otra parte, la densidad de corriente del prototipo, tras ajustar las variables eléctricas de entrada, se visualiza en la figura que se expone a continuación.

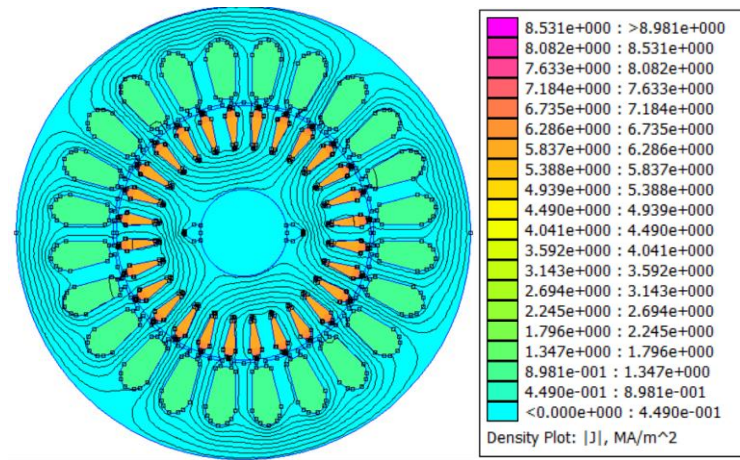


Figura 54. Magnitud de la densidad del flujo del prototipo.

Del mismo modo, se observa una densidad de corriente más elevada en especial en el rotor, aproximándose a valores cercanos a 5,837 [MA/m²]. Esto implica un funcionamiento optimizado del motor de inducción, reflejando un diseño que maximiza la eficiencia y reduce las pérdidas por efecto Joule, que de la misma manera a una menor resistencia en el rotor. Por ende, este prototipo demuestra una mayor eficacia en comparación con su configuración inicial y el funcionamiento del prototipo bajo condiciones nominales de operación, mientras que para considerar su óptimo funcionamiento se debe realizar el redimensionamiento del bobinado del estator junto al núcleo del estator y rotor.

4.4 Análisis de la MI convencional en Simulink

Se desarrolló un diagrama de bloques para analizar detalladamente el motor trifásico de inducción tipo jaula de ardilla de ½ HP, respecto a las resistencias e inductancias correspondientes a la MI convencional y el prototipo. Dentro del análisis, se evaluaron las curvas de torque, corriente y velocidad. Para esta evaluación, se tomaron en cuenta los parámetros especificados en la Tabla 19.

Tabla 19

Parámetros de la MI para la simulación en Simulink

Parámetro	Valor
Voltaje nominal	220V
Corriente	1.36A
Potencia	0.5HP/0.37kW
Frecuencia	60Hz
Numero de polos	4

Para la simulación, se tuvieron en cuenta las resistencias e inductancias, ajustándolas de acuerdo con los parámetros del circuito equivalente correspondiente al motor de inducción convencional y el prototipo. El diagrama de bloques realizado para este análisis se ilustra en la Figura 55.

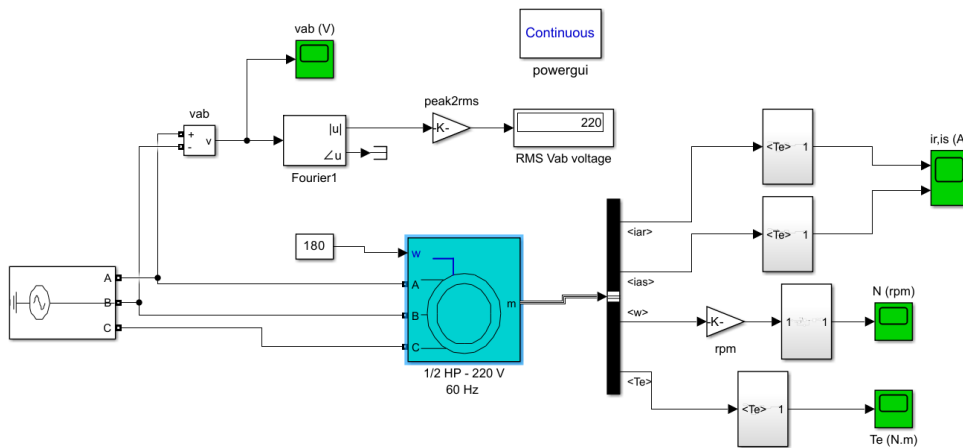


Figura 55. Diagrama de bloques en Simulink.

Se ajustó una fuente trifásica al voltaje nominal para configurar las características del motor. Para determinar las curvas características, se empleó un multiplexor que amplifica las señales de salida. Los bloques 'ir' e 'is' calcularon las corrientes y el bloque 'rpm' dedujo la velocidad del motor en RPM usando la señal de velocidad angular 'w'. Se añadió un bloque 'Te' para medir el torque y el bloque powergui para optimizar la simulación de entrega de energía en modo continuo.

La corriente del motor de inducción, representada en la Figura 56, muestra un pico inicial que corresponde a la corriente de arranque del motor, seguido de una serie de oscilaciones que disminuyen gradualmente a medida que el motor se estabiliza a los valores nominales de operación.

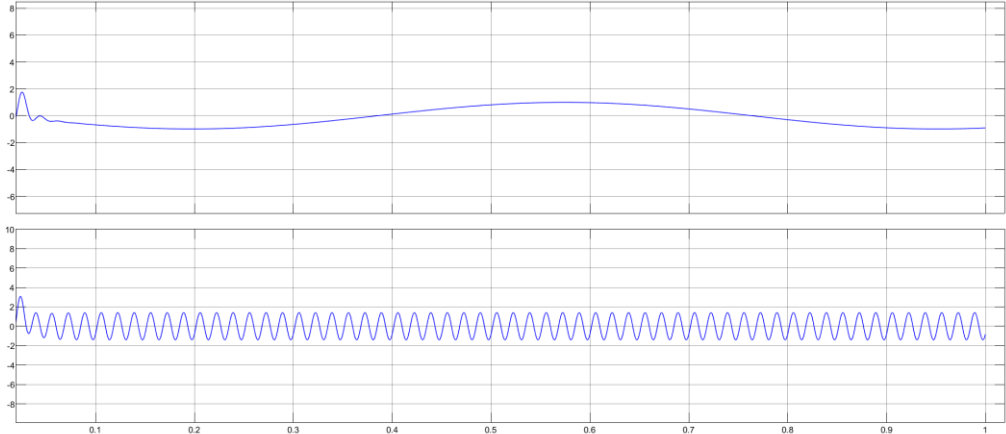


Figura 56. Corriente de la MI convencional.

En la Figura 57 se exhibe la curva de torque del motor de inducción convencional, donde se muestra que el torque varía entre 0 y 3 N.m. Este valor se asemeja al torque de arranque determinado en la Tabla 13.

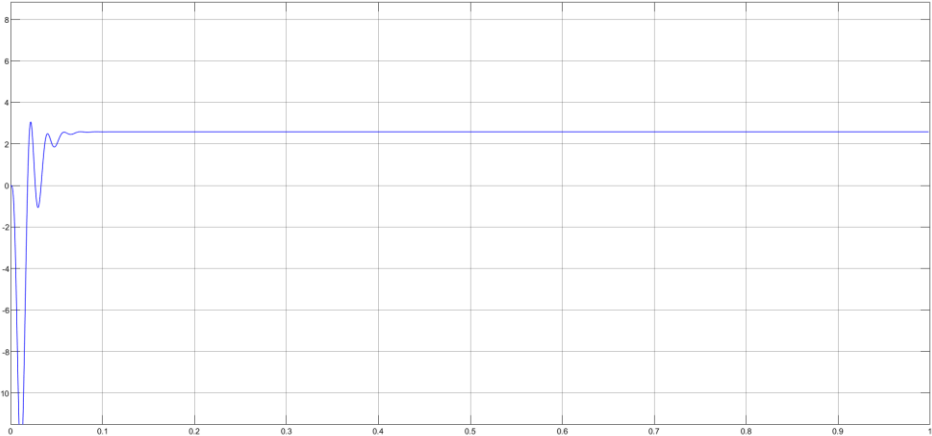


Figura 57. Torque del motor de inducción convencional.

A medida que aumenta la velocidad, el torque disminuye gradualmente, siguiendo una tendencia decreciente hasta alcanzar un valor casi constante. El valor constante indica el torque nominal del motor, que se mantiene relativamente estable en condiciones de carga nominal reflejando la respuesta inmediata y dinámica del motor.

La Figura 58 muestra la relación entre la velocidad y el tiempo del motor de inducción, donde se observa que la velocidad parte de 0 a 1700 RPM. Donde, el tiempo en el que la velocidad del motor se eleva coincide con los picos notables en las gráficas de corriente y torque.

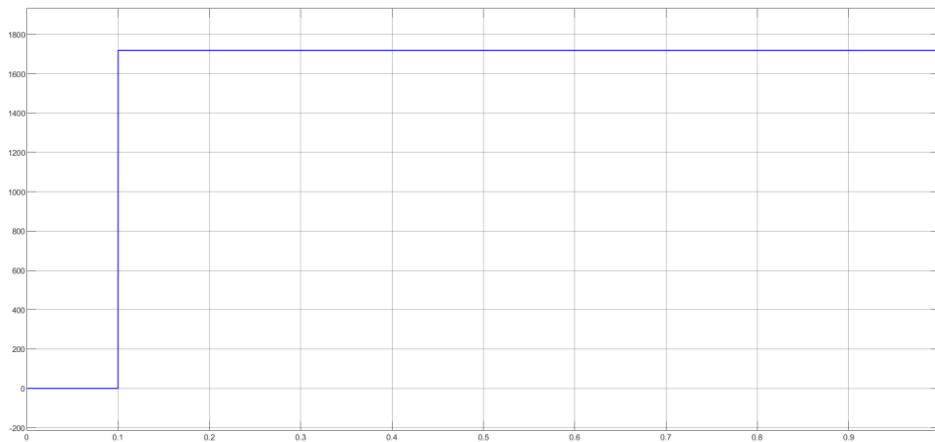


Figura 58. Velocidad del motor de inducción con respecto al tiempo.

En base a esta gráfica, se determina que el motor requiere una corriente inicial mucho mayor que la corriente de funcionamiento normal para superar la inercia y generar el torque necesario para ponerse en marcha, esta característica es muy común en los motores de inducción.

4.4.1 Análisis del prototipo de MI

Se analizó el prototipo teniendo en cuenta el voltaje nominal de entrada del motor, así como la corriente y la potencia obtenidas durante la prueba de funcionamiento en vacío. Este análisis se basó en los datos recopilados y presentados en la tabla siguiente, con el objetivo de destacar las mejoras conseguidas al incorporar cobre en las barras del rotor de jaula de ardilla.

Tabla 20

Parámetros del prototipo para la simulación en Simulink

Parámetro	Valor
Corriente	1.47A
Potencia	545,23W
Frecuencia	60Hz

Considerando el diagrama de bloques de la Figura 55, se ajustaron los parámetros del bloque correspondiente a la MI en función de los datos presentados en la Tabla 20, considerando el voltaje nominal y los 4 polos de la máquina. Se constató que la corriente resultante excedía en 0,11A a la obtenida por el MI estándar, como se evidencia en la Figura 42. Además, se notó un incremento sustancial en la corriente de arranque del prototipo, la cual superó significativamente los valores típicos. Este fenómeno se atribuye al aumento en la masa del rotor, una consecuencia directa de la sustitución del aluminio por cobre lo que incrementa la inercia de la MI y de igual manera atribuye al cambio de las características físicas de la MI.

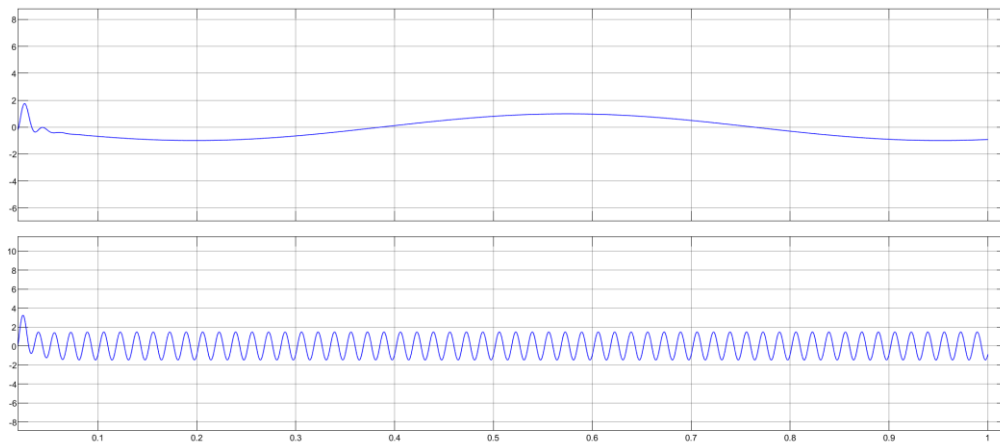


Figura 59. Corriente del prototipo en base a las variables nominales.

Además, en la Figura 60 se observó una alteración en el torque del prototipo en comparación al torque de la MI convencional, que se puede explicar principalmente por la resistencia, el diseño

del rotor y las características de las barras de cobre, incluyendo su tamaño, densidad y peso, así como la calidad de fabricación. Estos factores tienen un impacto significativo en el rendimiento de la máquina, como se evidenció en la Figura 37, donde no se generó un torque de arranque adecuado.

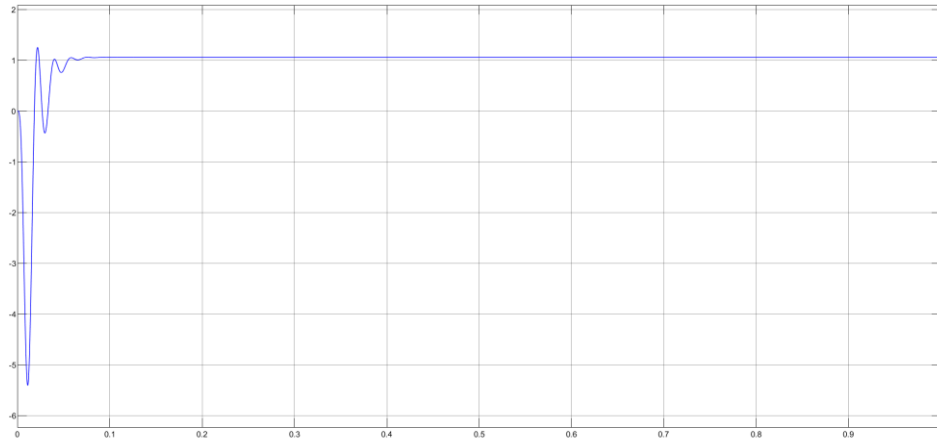


Figura 60. Torque del prototipo.

Por otro lado, se registró un aumento significativo en la velocidad del prototipo como se evidencia en la figura 61, ascendiendo a 1765 RPM, debido a las menores pérdidas mecánicas del rotor. Esto sugiere una mejora en la eficiencia de la MI, atribuible a la reducción de la resistencia del rotor al utilizar barras de cobre.

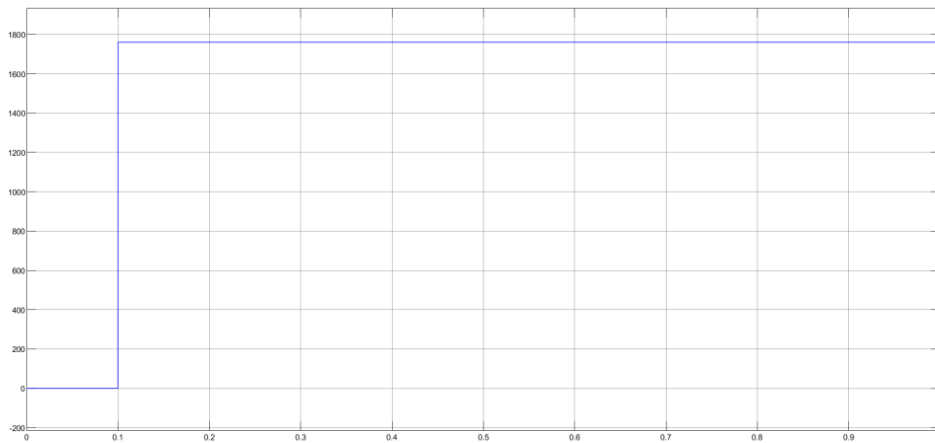


Figura 61. Velocidad del prototipo con respecto al tiempo.

Al ajustar las variables eléctricas de entrada en la máquina de inducción, se observó un aumento significativo en la corriente del prototipo, ilustrado en la Figura 62. Este incremento, atribuido a un voltaje de entrada superior al nominal, no representa inconvenientes durante el funcionamiento del prototipo. Esto se debe a que el prototipo difiere considerablemente de su configuración original en términos de parámetros físicos.

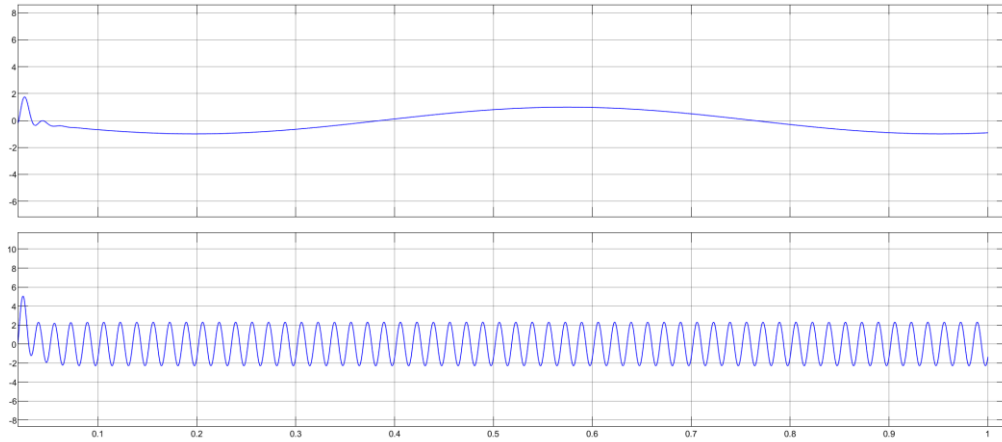


Figura 62. Corriente del prototipo en base a la corrección de las variables de entrada.

De la misma manera, el incremento del torque mejora notablemente la eficacia de la curva de par velocidad del prototipo, proporcionando un torque de arranque considerable que permite su funcionamiento bajo condiciones de carga.

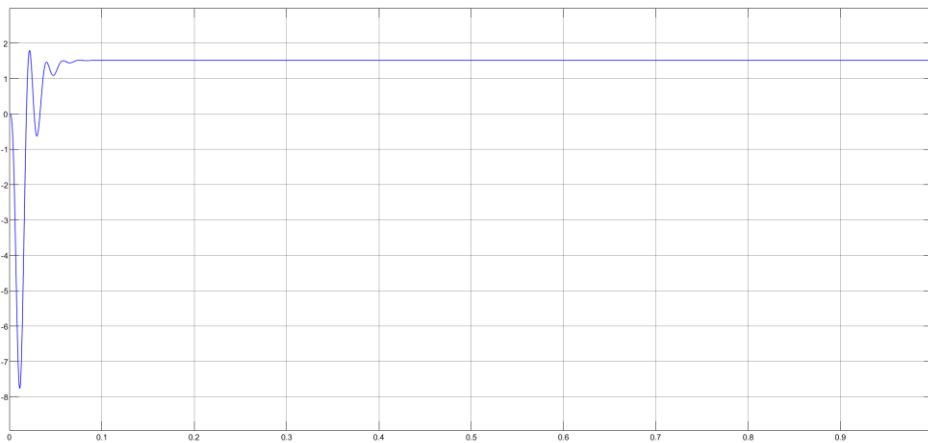


Figura 63. Torque del prototipo en base a la corrección de las variables de entrada.

4.5 Discusión

La configuración del circuito equivalente de un motor de inducción tipo jaula de ardilla, con barras tanto de aluminio como de cobre, destaca diferencias sustanciales en el rendimiento entre ambos diseños al evaluar sus características en base a las variables eléctricas nominales de la MI. El rotor del prototipo presento una resistencia notablemente más baja, específicamente con una diferencia de $0,25\Omega$, en comparación con su contraparte de aluminio de $3,96\Omega$. Esta variación, junto con cambios significativos en la inductancia tanto del estator como del rotor, resalta una modificación profunda en las propiedades eléctricas iniciales del motor, lo que a su vez se traduce en cambios significativos en las características físicas de la máquina.

Por otro lado, ajustes en la reactancia y resistencia del prototipo influyen directamente en su comportamiento, un aumento en la reactancia del estator disminuye el torque de arranque; una menor resistencia del rotor mejora la eficiencia general, pero reduce el torque tanto de arranque como máximo, complicando el manejo de cargas iniciales pesadas. Además, una reducción en la reactancia de magnetización eleva la eficiencia, aunque una disminución excesiva puede llevar a saturación magnética y a un aumento en las pérdidas, afectando negativamente el rendimiento de la MI. Estas alteraciones culminan en un torque de arranque menor para el prototipo, debido a la mayor inductancia del estator, menor resistencia R_2 y una relación de velocidad cercana a la síncrona de 1765 RPM, especialmente tras ajustar la tensión de entrada a 270V, lo cual reduce aún más la resistencia secundaria del rotor y permite alcanzar un torque inicial y máximo superior al aplicar 223V, asegurando que el motor opere dentro de los parámetros para los cuales fue dimensionado.

La construcción de un circuito equivalente es esencial para el análisis de los motores de jaula de ardilla, ya que permite discernir las diferencias entre sus valores de resistencias e inductancias.

Además, facilita la determinación de la corriente secundaria del rotor, un factor imprescindible para las simulaciones realizadas en software como FEMM. Donde se realizó el estudio de la distribución de flujos magnéticos junto con sus respectivas curvas y densidades de corriente, lo que posibilitó el análisis del comportamiento de la MI convencional y el prototipo y establecer sus diferencias. Se observó que la densidad de flujo magnético y la corriente eléctrica fueron relativamente mayores cuando se empleó cobre en el rotor. Los rangos obtenidos para la densidad de corriente oscilaron entre 4 y 10M [MA/m^2], mientras que la densidad de flujo magnético varió entre 0,8 y 1,05 Teslas, dentro de un margen que induce a saturación magnética al núcleo del rotor y el estator junto a su bobinado, lo que sugiere un redimensionamiento de los mismos para operar a un voltaje mayor del nominal.

Además, el análisis detallado de las curvas, como la densidad del flujo normal, así como las curvas de magnitud de la intensidad del campo, los mismos se encuentran ilustrados en los Anexos D y E respectivamente, proporcionan más información sobre el comportamiento del motor al utilizar aluminio y cobre en el rotor.

Mediante este análisis se validó, que el núcleo del rotor y del estator, así como su bobinado, en el caso del prototipo no soportan mayores tensiones que 270V, ya se exponen a saturación, por lo que es necesario realizar un redimensionamiento de los mismos, incluyendo la geometría de las ranuras del rotor.

El prototipo desarrollado logra una mejora modesta en la eficiencia. Sin embargo, su implementación conlleva una inversión económica significativa, lo cual se debe a la metodología propuesta en este proyecto. Esta inversión no se justifica desde una perspectiva de coste beneficio debido al alto costo de los elementos y equipos necesarios, ya que incrementa el precio del motor en un 30%, debido a los mayores costos asociados a la fabricación y el cobre.

Además, se observó un aumento significativo en el peso total de la MI, el cual se incrementó de 9.08 kg a 10.14 kg. Aunque el aumento en el peso de la MI podría considerarse un factor de riesgo en ciertas aplicaciones, este aspecto depende en gran medida de la ubicación y el contexto específico en el que se pretenda instalar la máquina. Por lo tanto, el incremento de peso no se identifica como un desafío significativo en el amplio espectro de posibles aplicaciones de este tipo de motores. Por otra parte, el incremento en la masa del rotor incrementa la inercia del mismo y genera problemas durante el arranque.

Por otra parte, se encuentran desafíos notables en cuanto al acceso a tecnologías y materiales específicos necesarios para reemplazar la jaula de ardilla. Un desafío particular es la adquisición de sosa cáustica en escamas, esencial para eliminar el aluminio sin comprometer la integridad de las chapas ferromagnéticas del rotor. Dicha sustancia es de difícil acceso en el país debido a su distribución altamente regulada. Como alternativa, se ha optado por realizar perforaciones en las barras conductoras del rotor para remover el aluminio, aunque esta técnica afecta negativamente el rendimiento del motor de inducción. Las discrepancias en los resultados operativos podrían ser mínimas, pero significativas, dada la presencia de aluminio en cada ranura de las barras.

Otro reto importante es la escasez de servicios de fundición de metales al vacío en pequeñas cantidades, un proceso vital para prevenir la oxidación del cobre y preservar sus propiedades conductoras. Esto dificulta la replicación artesanal del controlado proceso de fundición de anillos y barras conductoras del rotor. No obstante, se minimizan los riesgos al llevar a cabo la fundición en espacios confinados, utilizando varillas prefabricadas para las barras, aunque no se llega a cubrir toda el área de las ranuras del rotor y precalentando el rotor antes de la inyección del cobre fundido para la fabricación de los anillos de cortocircuito, mitigando así el impacto del cambio de temperatura.

Conclusiones

El motor de inducción de jaula de ardilla con barras de cobre es común en aplicaciones de alta potencia. La incorporación de cobre en lugar de aluminio, sin modificar la estructura del rotor y el estator, aumenta la eficiencia en al menos un 0.5%. Esto se debe a la mejor capacidad del cobre para la transferencia de corriente y su menor resistencia eléctrica, lo que reduce las pérdidas energéticas.

El análisis comparativo entre el motor convencional y el prototipo, utilizando herramientas computacionales, reveló diferencias significativas en su comportamiento dinámico. Los resultados del análisis de corriente, velocidad, torque y la curva par-velocidad demostraron que el prototipo es notablemente más eficiente que el motor convencional. Asimismo, el análisis mediante elementos finitos mostró que el prototipo logra una distribución más eficiente del flujo de densidad magnética y de la corriente eléctrica, superando sus características iniciales. No obstante, al considerar la corrección del voltaje de entrada en el prototipo, se observó que el núcleo del rotor, el estator y su devanado se aproximan a la saturación, lo que sugiere la necesidad de redimensionar estos componentes para asegurar un desempeño óptimo.

La implementación del prototipo permitió validar su comportamiento mediante pruebas características y de aislamiento. Esto no solo confirmó el óptimo funcionamiento de la máquina, sino que también validó los resultados obtenidos en las simulaciones, lo cual permitió ajustar las variables eléctricas de entrada para alcanzar un óptimo funcionamiento. Utilizar cobre en el rotor genera mejoras significativas en el comportamiento general de la máquina, como un torque de arranque y deslizamiento máximo menor, y un torque máximo cercano a la velocidad síncrona, superando en velocidad y potencia activa al motor convencional, lo que demuestra la eficiencia del prototipo.

Recomendaciones

Este estudio se centró en examinar el efecto de sustituir las barras y anillos de cortocircuito de aluminio en un rotor de jaula de ardilla por cobre, conservando las dimensiones y características originales de la geometría del rotor y el estator. El propósito fue evaluar cómo esta sustitución en el material conductor de las barras del rotor incide en el funcionamiento y rendimiento de la máquina mediante pruebas características. Los resultados demostraron el impacto positivo del cobre en la dinámica operativa del motor de inducción. A partir de estos hallazgos, se propone que investigaciones futuras realicen la implementación de un motor jaula de ardilla con barras de cobre u otros metales conductores o aleaciones, a través de una reconfiguración completa del motor, en motores de mayor potencia. Este enfoque implicaría una revisión completa del diseño del motor, particularmente del bobinado del estator, el núcleo del rotor, el estator y demás componentes como los rodamientos, con el objetivo de profundizar en el entendimiento del impacto de la optimización de materiales en el desempeño y eficiencia de las máquinas eléctricas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] T. Duran, V. Simovic, and B. V. Komljen, “Comparison of different methods for efficiency determination acc.to IEC for specific induction motor,” *2021 44th International Convention on Information, Communication and Electronic Technology, MIPRO 2021 - Proceedings*, pp. 172–176, 2021, doi: 10.23919/MIPRO52101.2021.9597116.
- [2] Kothari D P and Nagrath I J, “Electric Machines, fifth edition,” 2018.
- [3] “Máquinas y Accionamientos Eléctricos (3M4) | FI-UNMDP,” 2019. Accessed: Oct. 12, 2023. [Online]. Available: <http://www3.fi.mdp.edu.ar/electrica/maquinasyaccionamientos/>
- [4] K. N. Subedi, K. Kappagantula, F. Kraft, A. Nittala, and D. A. Drabold, “Electrical conduction processes in aluminum: Defects and phonons,” *Phys Rev B*, vol. 105, no. 10, Mar. 2022, doi: 10.1103/PHYSREVB.105.104114.
- [5] D. J. Kim, J. H. Choi, Y. Do Chun, D. H. Koo, and P. W. Han, “The Study of the Stray Load Loss and Mechanical Loss of Three Phase Induction Motor considering Experimental Results,” *Journal of Electrical Engineering and Technology*, vol. 9, no. 1, pp. 121–126, Jan. 2014, doi: 10.5370/JEET.2014.9.1.121.
- [6] A. Marfoli, M. DiNardo, M. Degano, C. Gerada, and W. Jara, “Squirrel Cage Induction Motor: A Design-Based Comparison Between Aluminium and Copper Cages,” *IEEE Open Journal of Industry Applications*, vol. 2, pp. 110–120, Apr. 2021, doi: 10.1109/ojia.2021.3073820.
- [7] Mantilla San Jose, “DISEÑO Y ANÁLISIS PARAMÉTRICO DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN TRIFÁSICO DE BAJA TENSIÓN CON SOFTWARE JMAG (Design and Parametric Analysis of a Three-Phase Low Voltage Induction Motor through JMAG Software) Para acceder al Título de,” p. 9, 2018.

- [8] Tong Wei, “Mechanical Design of Electric Motors,” 2014.
- [9] S. K. Sahdev, *Electrical Machines*. Cambridge University Press, 2018. doi: 10.1017/9781108355582.
- [10] I. Paul, A. Gomez, E. Dirigido, I. J. Manuel, and A. Castro, “Análisis, diseño y simulación del comportamiento mecánico de un motor asíncrono trifásico, utilizando el método de los elementos finitos,” 2018, Accessed: Jun. 17, 2023. [Online]. Available: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/15560>
- [11] P. Pecinka, S. Kocman, and V. Pecinkova, “Use of FEM modeling to optimize the design of induction motor,” *14th International Conference ELEKTRO, ELEKTRO 2022 - Proceedings*, 2022, doi: 10.1109/ELEKTRO53996.2022.9803602.
- [12] A. Marfoli, M. Di Nardo, M. Degano, C. Gerada, and W. Chen, “Rotor Design Optimization of Squirrel Cage Induction Motor-Part I: Problem Statement,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 36, no. 2, pp. 1271–1279, Jun. 2021, doi: 10.1109/TEC.2020.3019934.
- [13] Chapman Stephen J., *MÁQUINAS ELÉCTRICAS*, vol. Quinta edición. Mexico, 2012.
- [14] G. C. Stone, I. Culbert, E. A. Boulter, and H. Dhirani, “Rotating Machine Insulation Systems,” *Electrical Insulation for Rotating Machines*, pp. 1–46, Jul. 2014, doi: 10.1002/9781118886663.CH1.
- [15] D. Y. Construcción De Un Banco De and D. Alexander Sotomayor Cardenas, “ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA.”
- [16] W. N. Pacheco Chica and K. D. Santos Moreira, “Análisis tecnológico de motor de inducción trifásico tipo jaula de ardilla,” *Dominio de las Ciencias, ISSN-e 2477-8818, Vol. 6, Nº. Extra 5, 2020 (Ejemplar dedicado a: Diciembre Especial 2020), págs. 291-303*, vol. 6, no. 5, pp. 291–303, 2020, doi: 10.23857/dc.v6i3.1601.

- [17] J. Barta, N. Uzhegov, P. Losak, C. Ondrusek, M. MacH, and J. Pyrhonen, “Squirrel-Cage Rotor Design and Manufacturing for High-Speed Applications,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, no. 9, pp. 6768–6778, Sep. 2019, doi: 10.1109/TIE.2018.2879285.
- [18] S. N. Tripathy, S. Kundu, and A. Pradhan, “Multi-Objective Optimization Technique Based Design of Squirrel Cage Induction Motor,” in *2022 2nd International Conference on Power Electronics and IoT Applications in Renewable Energy and its Control, PARC 2022*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022. doi: 10.1109/PARC52418.2022.9726640.
- [19] M. REZAIEE NAKHAIE and R. ROSHANFEKR, “Effects of Geometric Dimension Variations on Efficiency of 3-phase Squirrel Cage Induction Motors Considering Economic Evaluation,” *Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering*, Jan. 2021, doi: 10.17694/bajece.732721.
- [20] D. Liang and V. Zhou, “Recent market and technical trends in Copper Rotors for High-Efficiency Induction Motors,” *2018 International Power Electronics Conference, IPEC-Niigata - ECCE Asia 2018*, pp. 1943–1948, Oct. 2018, doi: 10.23919/IPEC.2018.8507879.
- [21] A. Marfoli, M. DiNardo, M. Degano, C. Gerada, and W. Jara, “Squirrel Cage Induction Motor: A Design-Based Comparison Between Aluminium and Copper Cages,” *IEEE Open Journal of Industry Applications*, vol. 2, pp. 110–120, Apr. 2021, doi: 10.1109/ojia.2021.3073820.
- [22] M. Di Nardo, A. Marfoli, M. Degano, C. Gerada, and W. Chen, “Rotor Design Optimization of Squirrel Cage Induction Motor-Part II: Results Discussion,” *IEEE Transactions on*

- Energy Conversion*, vol. 36, no. 2, pp. 1280–1288, Jun. 2021, doi: 10.1109/TEC.2020.3020263.
- [23] Y. Xu, X. Bao, W. Xu, J. Fang, and T. Hong, “A Method for Improving Power Factor in Inverter-Fed Induction Motors by the Use of Rotor Convex Copper Bars,” *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 56, no. 4, pp. 3636–3643, Jul. 2020, doi: 10.1109/TIA.2020.2988843.
- [24] S. Yamamoto, “Overview of the Latest Research and Development for Copper Die-Cast Squirrel-Cage Rotors,” *2018 International Power Electronics Conference, IPEC-Niigata - ECCE Asia 2018*, pp. 1949–1954, Oct. 2018, doi: 10.23919/IPEC.2018.8507971.
- [25] I. Culbert, “Design, Construction, and Manufacture of Squirrel Cage Rotors,” *Current Signature Analysis for Condition Monitoring of Cage Induction Motors: Industrial Application and Case Histories*, pp. 39–54, Sep. 2016, doi: 10.1002/9781119175476.CH2.
- [26] P. Harnisch *et al.*, “Optimized Manufacturing Process and Modelling of Squirrel-Cage Induction Machines with Copper Cage and Axially Segmented End Rings for High-Speed Applications,” in *2020 10th International Electric Drives Production Conference, EDPC 2020 - Proceedings*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Dec. 2020. doi: 10.1109/EDPC51184.2020.9388213.
- [27] H. Matsumoto and K. Sakai, “A Motor Capable of Conversion Between Synchronous and Induction Motors with Pole Change for Electric Vehicles,” in *2022 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2022*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022. doi: 10.1109/ECCE50734.2022.9947446.
- [28] B. Bilgin and A. Emadi, “Electric motors in electrified transportation: A step toward achieving a sustainable and highly efficient transportation system,” *IEEE Power Electronics Magazine*, vol. 1, no. 2, pp. 10–17, Jun. 2014, doi: 10.1109/MPEL.2014.2312275.

- [29] C. H. Chao, "Tesla Model S Induction Motor Analysis," in *2023 IEEE 3rd International Conference on Power, Electronics and Computer Applications, ICPECA 2023*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2023, pp. 1462–1464. doi: 10.1109/ICPECA56706.2023.10075690.
- [30] R. Thomas, H. Husson, L. Garbuio, and L. Gerbaud, "Comparative study of the Tesla Model S and Audi e-Tron induction motors," in *2021 17th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems, ELMA 2021 - Proceedings*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Jul. 2021. doi: 10.1109/ELMA52514.2021.9503055.
- [31] D. Meeker, "Finite Element Method Magnetics Version 4.2 User's Manual," 2020.
- [32] P. Pecinka, S. Kocman, and V. Pecinkova, "Use of FEM modeling to optimize the design of induction motor," in *14th International Conference ELEKTRO, ELEKTRO 2022 - Proceedings*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022. doi: 10.1109/ELEKTRO53996.2022.9803602.
- [33] A. Marfoli, M. Di Nardo, M. Degano, and C. Gerada, "ROTOR SLOT OPTIMIZATION OF SQUIRREL CAGE INDUCTION MOTOR," 2020.
- [34] A. Reinap, "Numerical modelling and design of electrical devices," 2020.
- [35] "MATLAB." Accessed: Aug. 31, 2023. [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>
- [36] A. M. Elsayed, Jāmi‘at al-Minūfiyah. Faculty of Engineering. Electrical Engineering Department, IEEE Power Electronics Society, Institute of Electrical and Electronics Engineers. Egypt Section., and Institute of Electrical and Electronics Engineers, *2017 Nineteenth International Middle-East Power Systems Conference (MEPCON)*:

proceedings: Electrical Engineering Department, Faculty of Engineering, Menoufia University, Egypt, 19-21 December 2017.

- [37] I. Laouar and A. Boukadoum, “Design Optimization of a Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motor by Algorithm Harmony Search,” *2022 IEEE International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb, CISTEM 2022*, 2022, doi: 10.1109/CISTEM55808.2022.10044025.
- [38] G. Sharma, D. Parashar, and A. Chandel, “Analysis of Dynamic Model of Three Phase Induction Motor with MATLAB/SIMULINK,” in *Proceedings - 2020 International Conference on Advances in Computing, Communication and Materials, ICACCM 2020*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Aug. 2020, pp. 51–58. doi: 10.1109/ICACCM50413.2020.9212965.
- [39] “Kit Horno de Fusión de Metal Eléctrico 3KG – ToAuto Tool.” Accessed: Nov. 02, 2023. [Online]. Available: <https://www.toautotool.com/products/3kg-electric-metal-forging-melting-furnace-smelting-furnace-gold-silver-smelter-110v>
- [40] Amprobe, “User’s Manual • Mode d’emploi • Bedienunghandbuch • Manual d’Uso • Manual de uso ACD-45PQ 600A Power Quality Clamp”.
- [41] “Amprobe | Herramientas de prueba y medición eléctrica.” Accessed: Nov. 02, 2023. [Online]. Available: <https://www.amprobe.com/>
- [42] “Comprobador de resistencia de aislamiento Fluke 1507 | Fluke.” Accessed: Nov. 09, 2023. [Online]. Available: <https://www.fluke.com/es-ec/producto/comprobacion-electrica/comprobadores-de-aislamiento/fluke-1507>
- [43] “Yescom 30v 10A Fuente de alimentación Convertidor de CC Voltaje variable de precisión – yescomusa.” Accessed: Nov. 05, 2023. [Online]. Available:

https://www.yescomusa.com/products/30v-10a-precision-variable-voltage-power-supply-dc-converter?_pos=2&_sid=363ed7736&_ss=r

- [44] IEEE Power Engineering Society, I. of E. and E. E. Electric Machinery Committee, American National Standards Institute, and IEEE-SA Standards Board, *Test procedure for polyphase induction motors and generators*. New York, N.Y.: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2004.
- [45] International Electrotechnical Commission, “CEI 60034-12:2016,” in *Rotating electrical machines - Part 12: Starting performance of single-speed three-phase cage induction motors*, 2016.
- [46] International Electrotechnical Commission, “IEC 60034-1:2022 RLV Redline version,” in *Rotating electrical machines - Part 1: Rating and performance*, 2022.

ANEXOS

Anexo A: Código de MATLAB para la determinación del circuito equivalente y la representación gráfica de la curva par velocidad.

```
clc;
clear all;
%=====
% Resultados de las pruebas de la MI convencional
%=====
% Prueba DC
r11 = 12.16;
% Prueba en vacío
V11=220;
V21=220;
V31=220;
VT11 = mean([V11, V21, V31]);
I11 = 1.35;
I21 = 1.39;
I31 = 1.34;
Iprom1 = mean([I11, I21, I31]);
P11 = 378.21;
% Prueba de rotor bloqueado
V11 = 36,9;
V21 = 36,9;
V31 = 36.9;
VT21 = mean([V11, V21, V31]);
Inom = 1.87;
P21 = 86.19;
% Cálculos
Vfase1 = VT11 / sqrt(3);
Zsc1 = Vfase1 / Iprom1;
Zrb1 = VT21 / (sqrt(3) * Inom);
Angulo1 = acos(P21 / (sqrt(3) * VT21 * Inom));
Rrb1 = Zrb1 * cos(Angulo1);
r21 = r11 - Rrb1;
Xrb1 = Zrb1 * sin(Angulo1);
x11 = Xrb1 * 0.4;
x21 = Xrb1 * 0.6;
xm1 = Zsc1 - x11;
% Crear una tabla
resultadosTabla1 = table(r11, r21, x11, x21, xm1);
% Mostrar la tabla
disp('Resultados de la MI convencional:');
disp(resultadosTabla1);
```

```

%=====
% Resultados de las pruebas del prototipo
%=====
% Prueba DC
r12 = 12.16;
% Prueba en vacío
V12=270.8;
V22=268.5;
V32=269.2;
VT12 = mean([V12, V22, V32]);
I12 = 2.23;
I22 = 2.35;
I32 = 2.29;
Iprom12 = mean([I12, I22, I32]);
P12 = 1063;
% Prueba de rotor bloqueado
V12 = 113.2;
V22 = 113;
V32 = 113.1;
VT22 = mean([V12, V22, V32]);
Inom2 = 2.39;
P22 =266.4;
% Cálculos
Vfase2 = VT12 / sqrt(3);
Zsc2 = Vfase2 / Iprom12;
Zrb2 = VT22 / (sqrt(3) * Inom2);
Angulo2 = acos(P22 / (sqrt(3) * VT22 * Inom2));
Rrb2 = Zrb2 * cos(Angulo2);
r22 = Rrb2 - r12;
Xrb2 = Zrb2 * sin(Angulo2);
x12 = Xrb2 * 0.4;
x22 = Xrb2 * 0.6;
xm2 = Zsc2 - x12;
% Crear una tabla
resultadosTabla2 = table(r12, r22, x12, x22, xm2);
% Mostrar la tabla
disp('Resultados del prototipo:');
disp(resultadosTabla2);
%=====
% CALCULOS
%=====
v_phase = 220 / sqrt(3); % Voltaje de fase
v_phase2 = 280 / sqrt(3); % Voltaje de fase
%=====
% Velocidad síncrona
n_sync = 1800; % r/min

```

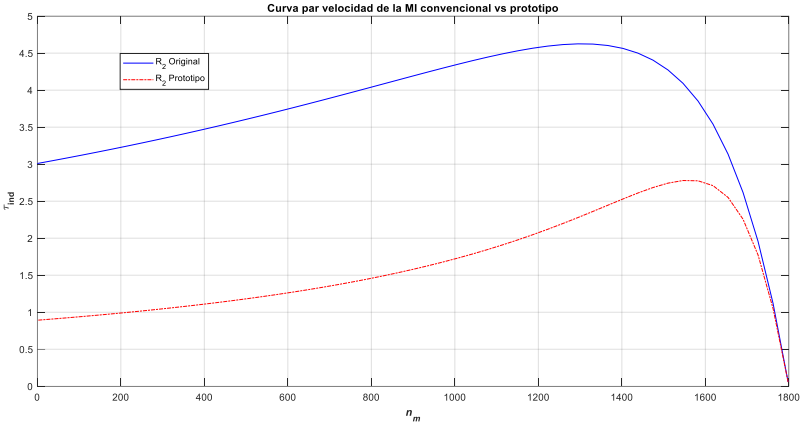
```

w_sync = 188.5; % rad/s
% Calcular el voltaje e impedancia para MI convencional
[v_th1, z_th1, r_th1, x_th1] = calcularVoltajeImpedancia(v_phase, xm1, r11, x11, xm1);
% Calcular el voltaje e impedancia para el prototipo
[v_th2, z_th2, r_th2, x_th2] = calcularVoltajeImpedancia(v_phase2, xm2, r12, x12, xm2);
% Calcular la característica par-velocidad para muchos deslizamientos entre 0 y 1.
s = linspace(0.001, 1, 51); % Deslizamiento
nm = (1 - s) * n_sync; % Velocidad mecánica
% Calcular el par para la resistencia del rotor original y del prototipo
t_ind1 = calcularParVelocidad(v_th1, r_th1, x_th1, r21, x21, w_sync, s);
t_ind2 = calcularParVelocidad(v_th2, r_th2, x_th2, r22, x22, w_sync, s);
resultadosTabla3 = table(v_th1, r_th1, x_th1);
    disp('Resultado equivalente TH1:');
    disp(resultadosTabla3);
resultadosTabla4 = table(v_th2, r_th2, x_th2);
    disp('Resultados equivalente TH12:');
    disp(resultadosTabla4);
% Hacer la gráfica de la curva par-velocidad
graficarCurvaParVelocidad(nm, t_ind1, t_ind2);
% Funciones auxiliares
function [v_th, z_th, r_th, x_th] = calcularVoltajeImpedancia(v_phase, xm, r, x, xm1)
    v_th = v_phase * (xm / sqrt(r^2 + (x + xm)^2));
    z_th = ((1j * xm) * (r + 1j * x)) / (r + 1j * (x + xm1));
    r_th = real(z_th);
    x_th = imag(z_th);
end
function t_ind = calcularParVelocidad(v_th, r_th, x_th, r, x, w_sync, s)
    t_ind = zeros(size(s));
    for ii = 1:length(s)
        t_ind(ii) = (3 * v_th^2 * r / s(ii)) / (w_sync * ((r_th + r/s(ii))^2 + (x_th + x)^2));
    end
end
function graficarCurvaParVelocidad(nm, t_ind1, t_ind2)
    figure;
    plot(nm, t_ind1, 'Color', 'b', 'LineWidth', 1.0);
    hold on;
    plot(nm, t_ind2, 'Color', 'r', 'LineWidth', 1.0, 'LineStyle', '-');
    xlabel('\bf{itn}_{m}');
    ylabel('\bf{tau}_{ind}');
    title('\bf Curva par velocidad de la MI convencional vs prototipo');
    legend('R_{2} Original', 'R_{2} Prototipo');
    grid on;
    hold off;
end

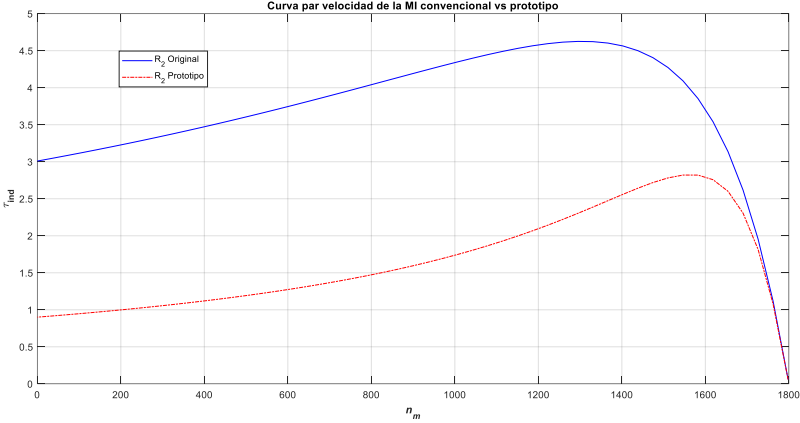
```


Anexo B: Curvas par velocidad del prototipo en base a la corrección de las variables de entrada en rotor bloqueado en base al voltaje de entrada de 220V y 1,47A en vacío.

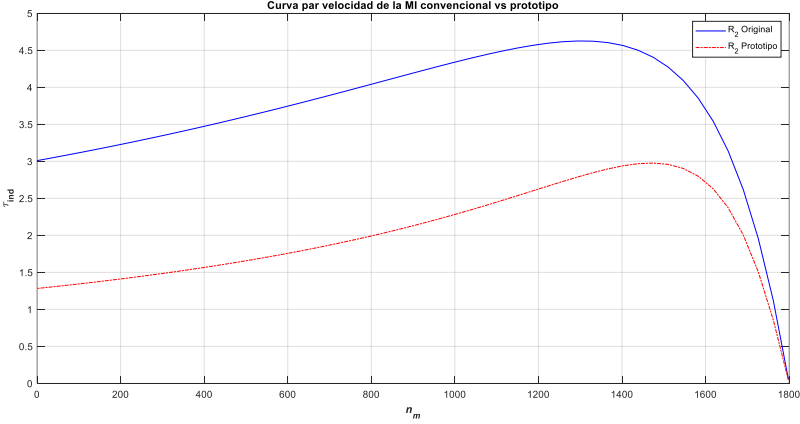
- **98V, 1,9A y 170,5W**



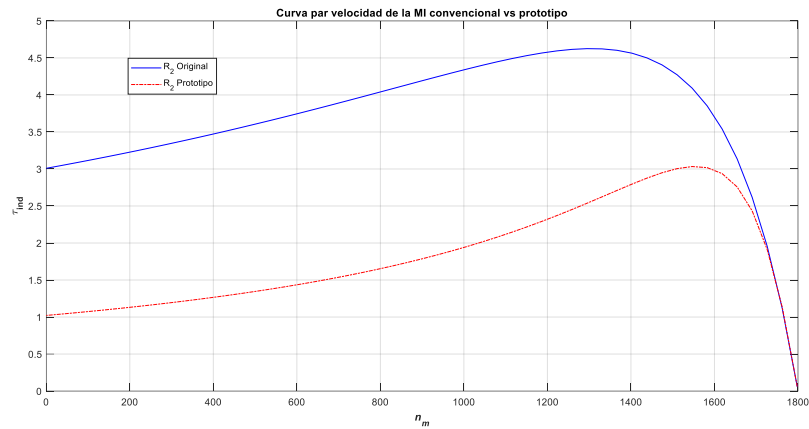
- **103V, 2,03A y 193,4W**



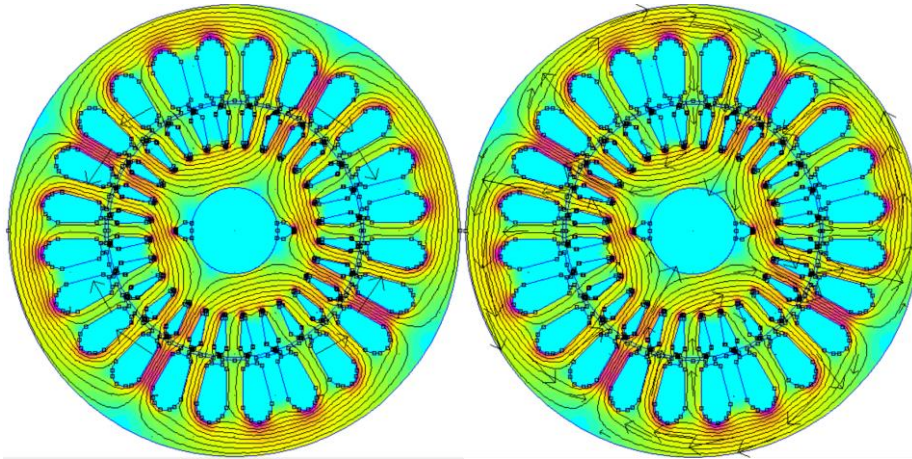
- **108V, 2,19A y 241,7W**



- 113V, 2,39A y 266,4W



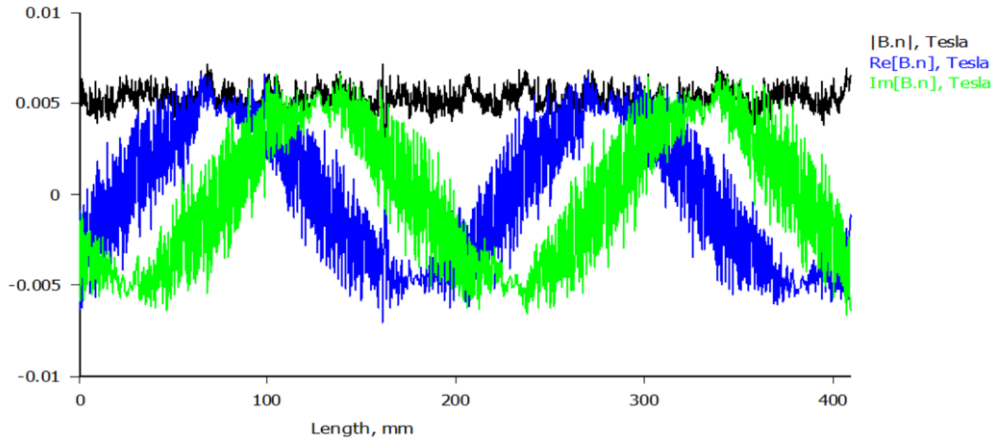
Anexo C: Orientación y dispersión del flujo magnético de la MI



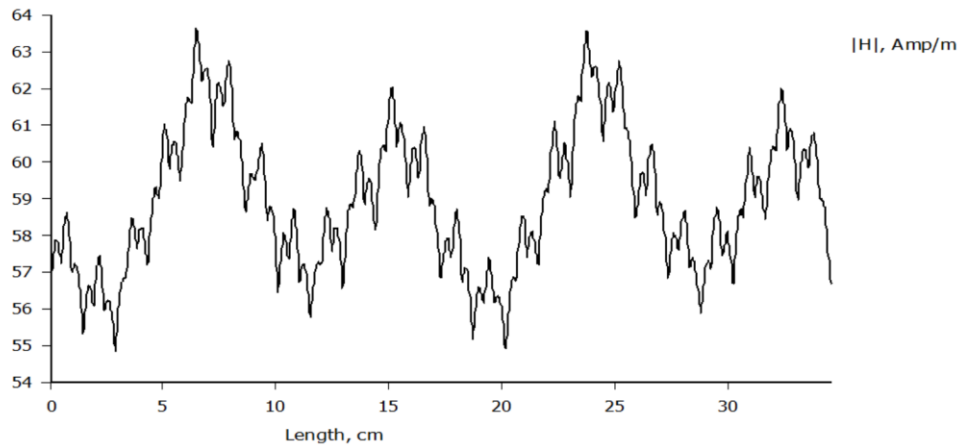
Anexo D: Análisis de la densidad de flujo y la intensidad de campo de la MI convencional a

60Hz en FEMM

- Densidad de flujo normal



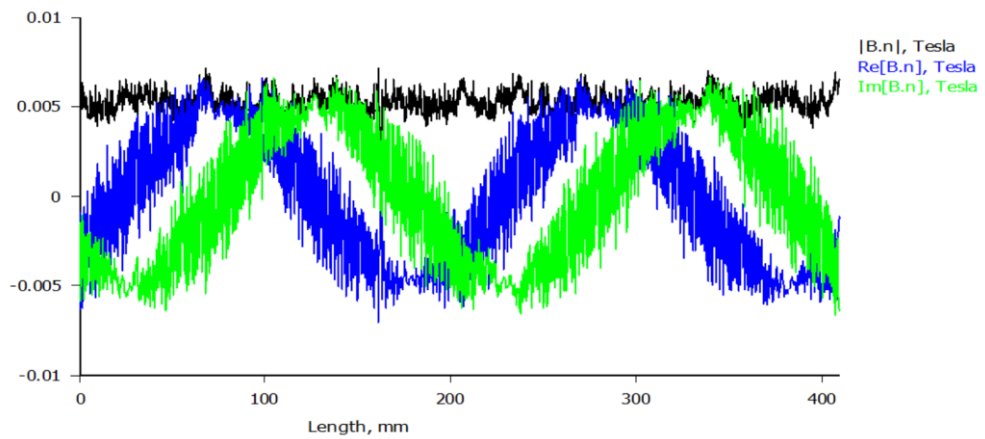
- Magnitud de la intensidad del campo



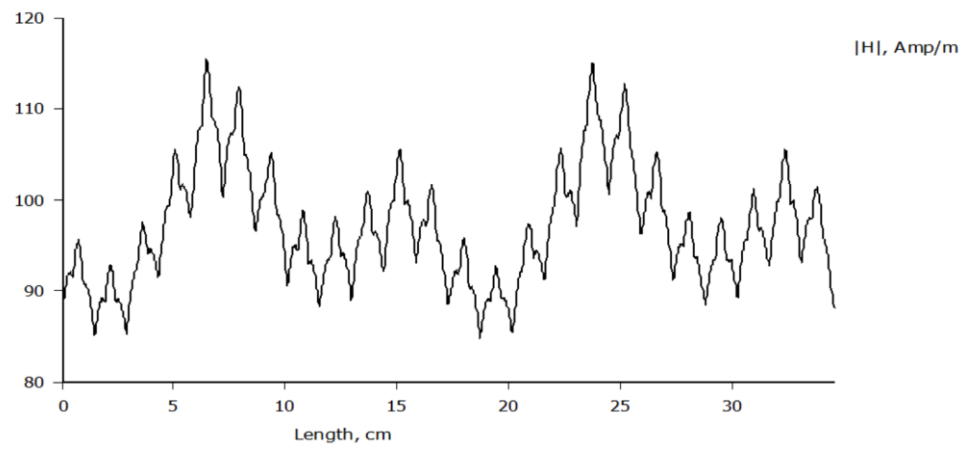
Anexo E: Análisis de la densidad de flujo y la intensidad de campo del prototipo a 60Hz en

FEMM

- Densidad de flujo normal



- Magnitud de la intensidad del campo



Anexo F: Velocidad del prototipo en RPM



NOMBRE DEL TRABAJO

QuilcaEmerson_TIC_1.docx

AUTOR

Emerson Quilca 3

RECUENTO DE PALABRAS

25130 Words

RECUENTO DE CARACTERES

133948 Characters

RECUENTO DE PÁGINAS

125 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO

27.2MB

FECHA DE ENTREGA

Jun 12, 2024 11:27 AM GMT-5

FECHA DEL INFORME

Jun 12, 2024 11:30 AM GMT-5**● 9% de similitud general**

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos.

- 7% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 6% Base de datos de trabajos entregados
- 1% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

● Excluir del Reporte de Similitud

- Material bibliográfico
- Material citado
- Fuentes excluidas manualmente
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 10 palabras)