



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA
CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

PROTECCIÓN DE LA MÁQUINA DE INDUCCIÓN
MEDIANTE SU MODELO TÉRMICO

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

AUTORES: CARLOS FERNANDO NAULA MOROCHO
ISRAEL DAVID LITUMA PINTADO

TUTOR: ING. JOSE MANUEL ALLER CASTRO, PHD

CUENCA - ECUADOR

2024

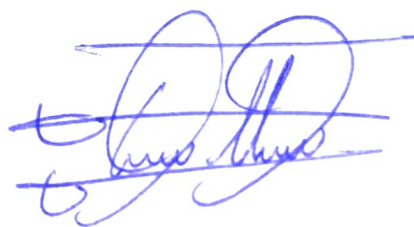
CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Carlos Fernando Naula Morocho con documento de identificación N° 0106786692 y Israel David Lituma Pintado con documento de identificación N° 0106197254 manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 15 de Enero del 2024

Atentamente,



Carlos Fernando Naula Morocho
0106786692



Israel David Lituma Pintado
0106197254

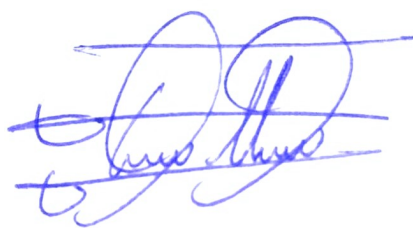
**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL
TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, Carlos Fernando Naula Morocho con documento de identificación N° 0106786692 y Israel David Lituma Pintado con documento de identificación N° 0106197254 expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos los autores del Proyecto Técnico: "Protección de la máquina de inducción mediante su modelo térmico", el cual a sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 15 de Enero del 2024

Atentamente,



Carlos Fernando Naula Morocho
0106786692



Israel David Lituma Pintado
0106197254

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, José Manuel Aller Castro con documento de identificación N° 015-1561800, docente de la Universidad Politécnica Salesiana - Sede Cuenca, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: PROTECCIÓN DE LA MÁQUINA DE INDUCCIÓN MEDIANTE SU MODELO TÉRMICO, realizado por Carlos Fernando Naula Morocho con documento de identificación N° 0106786692 y por Israel David Lituma Pintado con documento de identificación N° 0106197254, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 15 de enero del 2024

Atentamente,



Ing. José Manuel Aller Castro, PhD
0151561800

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi sincero agradecimiento a todas las personas que contribuyeron en gran medida a la culminación de este proyecto.

En primer lugar, agradezco a mi tutor, el Dr. José Manuel Aller Castro, por su valiosa contribución, paciencia y experiencia durante todo el proceso de investigación. Su apoyo ha sido fundamental y estoy enormemente agradecido por su guía.

También quiero agradecer infinitamente a mis padres, quienes han sido mis pilares emocionales. Su amor incondicional y fe en mis capacidades me han ayudado a superar las dificultades que he enfrentado. Su apoyo ha sido crucial en mi éxito académico.

A mi esposa e hija, les agradezco de todo corazón por su constante apoyo. Su presencia y palabras de aliento han sido mi mayor fortaleza en este trayecto. Estoy profundamente agradecido por tenerlas en mi vida.

Además, quiero expresar mi gratitud a mis queridos hermanos por su apoyo incondicional y palabras de aliento. También agradezco a mis abuelos por su apoyo y orgullo en mis logros.

Un agradecimiento especial va dirigido a mi suegra y cuñada, cuya colaboración ha sido invaluable para mantener mi trayectoria académica. Su apoyo ha sido fundamental y les estoy muy agradecido.

También quiero agradecer a la Universidad Politécnica Salesiana por brindarme la oportunidad de avanzar en mi carrera profesional. Agradezco especialmente al Departamento de Electricidad por su apoyo y disposición para resolver mis dudas e inconvenientes. Su contribución ha sido fundamental en mi desarrollo académico.

Agradezco de manera especial a mi compañero de tesis, Carlos, cuyo esfuerzo y colaboración hicieron posible culminar este proyecto de manera exitosa. También quiero agradecer a todos mis amigos, quienes estuvieron a mi lado durante este desafiante camino. Juntos compartimos momentos de estrés y alegría, y gracias a su apoyo, logramos superar todos los obstáculos. Los considero mi familia elegida y estoy agradecido por su sincera amistad.

Israel David Lituma Pintado

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a Dios por brindarme salud y sabiduría, permitiéndome alcanzar esta gran meta en mi vida. Agradezco a mis padres, hermanos y familiares por su apoyo incondicional, consejos y comprensión en todo momento.

Expreso mi profundo agradecimiento a la Universidad Politécnica Salesiana por brindarme una excelente formación académica durante mi carrera. Agradezco a todos los docentes por compartir sus vastos conocimientos. Quiero destacar especialmente a mi tutor, el Dr. José Manuel Aller Castro, por su invaluable ayuda, paciencia y conocimientos que fueron fundamentales para la culminación de este trabajo de titulación.

También agradezco a mi compañero de tesis, Israel, por su dedicación, responsabilidad y trabajo arduo para completar este proyecto. A todos mis amigos y compañeros que me apoyaron y acompañaron durante mi tiempo en la universidad, les estoy sinceramente agradecido.

Carlos Fernando Naula Morocho

DEDICATORIA

Dedico mi tesis a Dios por brindarme la fuerza necesaria para la culminación de una meta.

A mis padres, José y Ana por su amor, paciencia y su motivación para seguir adelante. A mis hermanos por sus consejos morales.

Una dedicación especial a mi mujer e hija por brindarme el apoyo la tolerancia, paciencia que supieron mostrarme y por cederme su tiempo para que pueda estudiar, por permitirme culminar una meta personal a ser una meta familiar a ustedes mi gratitud y amor infinito un sueño de la mano de mi mejor sueño.

A mi suegra y cuñada por el apoyo, la comprensión mostrada por el camino que estaba construyendo gracias fue una ayuda muy importante para conseguir este logro.

A mi compañero de tesis y amigo por el apoyo que me brindo, sus conocimientos, ánimos y la dedicación que mostró en momentos difíciles de la tesis. Finalmente, dedico este logro a todas esas personas que ponían en duda este logro y que nunca creyeron en mí con esos ánimos hicieron que coja mas fuerza e impulso para mantenerme firme y no rendirme en todo mi trayecto gracias.

Israel David Lituma Pintado

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de titulación a Dios por bendecirme darme fortaleza y ayudarme siempre en cada instante de mi vida.

Se lo dedico a mis padres Reinaldo y Rosa por su amor, motivación y su gran esfuerzo y sacrificio que realizan para estar apoyándome en todo momento y por siempre estar dándome ánimos para seguir adelante, a mis hermanos Edison, Diana y Patricio por sus valiosos consejos, su motivación y todo su apoyo entregado para conseguir este logro.

Dedico también a mi tía Angelita y a mi primo Christian por todo su cariño y apoyo brindado siempre.

Carlos Fernando Naula Morocho

RESUMEN

En este proyecto se ha realizado un modelo térmico de un motor de inducción trifásico de rotor bobinado y se han determinado sus parámetros mediante ensayos térmicos y eléctricos en laboratorio. El objetivo del desarrollo de este modelo es determinar los límites térmicos de la máquina utilizando las tensiones y las corrientes medidas en bornes del convertidor, con el fin de permitir la protección de la misma.

Según cada tipo de prueba térmica realizada en corriente continua (CC) y corriente alterna (CA), se obtienen resultados de las temperaturas medidas en los devanados de estator y del rotor con respecto al ambiente. El modelo considera el régimen dinámico de calentamiento y la solución de régimen permanente.

El desarrollo de un modelo térmico de segundo orden requirió la obtención de las pérdidas de potencia, así como los parámetros del modelo térmico de la máquina de inducción.

Los resultados del modelo permiten predecir con precisión los niveles de temperatura que alcanzarán los devanados del estator y del rotor en diferentes condiciones de operación.

ABSTRACT

In this project, a thermal model of a three-phase wound rotor induction motor has been developed, and its parameters have been determined through thermal and electrical tests in the laboratory. The objective of developing this model is to determine the thermal limits of the machine using the voltages and currents measured at the converter terminals, in order to enable its protection.

Based on each type of thermal test performed in direct current (DC) and alternating current (AC), results of the temperatures measured in the stator and rotor windings with respect to the ambient temperature are obtained. The model considers the dynamic heating regime and the steady-state solution.

The development of a second-order thermal model required obtaining power losses as well as the parameters of the induction machine's thermal model.

The results of the model accurately predict the temperature levels that the stator and rotor windings will reach under different operating conditions.

PALABRAS CLAVES TEMÁTICAS

Modelo eléctrico, Modelo térmico, Máquina de inducción (MI), Ensayos térmicos, Temperatura, Régimen Permanente, Determinación de Parámetros.

Índice

1. Introducción	17
1.1. Antecedentes	18
1.2. Objetivos	20
1.3. Objetivo general	20
1.4. Objetivos específicos	20
2. Metodología y Marco Teórico	20
2.1. Marco Teórico	21
2.1.1. Máquinas eléctricas	21
2.1.2. Máquina de inducción	22
2.1.3. Modelo de la máquina de inducción	25
2.1.4. Modelo de la máquina de inducción en coordenadas primitivas	26
2.1.5. Vectores espaciales	28
2.1.6. Vectores espaciales referidos al estator	28
2.1.7. Régimen Permanente	29
2.1.8. Ensayos para obtener las pérdidas de potencia en el motor de inducción	31
2.1.9. Ecuaciones de la maquina de inducción	32
2.1.10. Análisis teórico de las pérdidas en función de la temperatura en motores de inducción	36
2.2. Análisis térmico en la máquina eléctrica	38
2.2.1. Sobrecarga térmica en la máquina eléctrica	38
2.2.2. Modelos térmicos	39
2.2.3. Estimación de las pérdidas del motor	41
2.2.4. Proceso de transferencia de calor en análisis térmico de motores de inducción	42
2.2.5. Estimación de parámetros del modelo térmico de la MI	44
2.2.6. Ensayos para obtener los parámetros térmicos del modelo de la MI	47
2.2.7. Técnicas de análisis térmico	48
2.2.8. Métodos analíticos	48
2.2.9. Métodos numéricos	48
2.2.10. Modelo de componente experimental	49
2.3. Equipos de medición de temperatura	49
2.3.1. Termómetros infrarrojos Fluke 62 MAX y 62 MAX+	49

2.3.2.	Medidor de temperatura de cuatro canales con registrador SD	50
2.3.3.	Multímetro digital con termocupla para medición de temperatura	52
2.3.4.	Termopares o termocuplas	53
3.	Modelación y pruebas de la MI	55
3.1.	Cálculo de parámetros del modelo eléctrico de la MI	55
3.2.	Ensayos térmicos:	60
3.2.1.	Colocación de los termopares en la MI	61
3.2.2.	Resultados de temperatura obtenidos mediante el equipo de medición en la prueba CC con inyección de corriente en el estator	64
3.2.3.	Cálculo de la resistencia y capacitancia térmica del estator	65
3.3.	Segunda prueba	68
3.3.1.	Resultados de temperatura obtenidos mediante el equipo de medición en la prueba dos	68
3.3.2.	Cálculo de la resistencia térmica del rotor y la capacitancia térmica del rotor.	69
3.3.3.	Determinación de parámetros de resistencias y capacitancias térmicas mediante los ensayos uno y dos para validación del modelo térmico	71
3.4.	Tercera prueba	74
3.4.1.	Resultados de temperatura obtenidos mediante el equipo de medición en la prueba tres	75
3.4.2.	Cálculo de la resistencia térmica del estator y la capacitancia térmica en la prueba tres	76
3.5.	Cuarta Prueba	77
3.5.1.	Resultados de temperatura obtenidos mediante el equipo de medición en la prueba cuatro	78
3.5.2.	Cálculo de la resistencia térmica del estator y la capacitancia térmica en la prueba 4.	79
4.	Simulaciones con el modelo térmico de la máquina de inducción trifásica	81
4.1.	Simulación del modelo en ATP	81

4.1.1.	Simulación modelo térmico con el primer y segundo ensayo	81
4.1.2.	Simulación temperatura estator rotor	82
4.1.3.	Curva lado de el estator	83
4.1.4.	Curva lado de el rotor	84
4.1.5.	Comparación entre valores térmicos obtenidos en ensayos en laboratorio y simulación	84
4.2.	Simulación modelo térmico tercer ensayo	85
4.2.1.	Comparativa entre valores térmicos obtenidos en ensayos en laboratorio y simulación	86
4.3.	Simulación modelo térmico con el cuarto ensayo	86
4.3.1.	Comparativa entre valores térmicos obtenidos en ensayos en laboratorio y simulación	87
5.	Conclusiones y Recomendaciones	88
5.1.	Conclusiones	88
5.2.	Recomendaciones	89

Índice de figuras

1.	Máquina de inducción trifásica	23
2.	Partes principales motor de inducción trifásico [1]	24
3.	Despiece de la maquina de inducción de jaula de ardilla [2]	25
4.	Diagrama esquemático de las bobinas de una máquina de inducción trifásica en el rotor y estator [3]	26
5.	Modelo de la máquina de inducción en régimen permanente	30
6.	Modelo eléctrico clásico de la máquina de inducción trifásica	31
7.	Diagrama de conexión ensayo en vacío	32
8.	Ciclo de histéresis de un material magnético blando a diferentes temperaturas [4]	37
9.	Modelo térmico de primer orden de la máquina de inducción [5]	40
10.	Modelo térmico de segundo orden de la máquina de inducción [5]	40
11.	Flujo de potencia y pérdidas de los motores de inducción [5]	41
12.	Parámetros térmicos de la MI utilizando un modelo simplificado de primer orden [6]	47
13.	Termómetro IR infrarrojo Fluke 62 MAX [7]	50

14.	Medidor de temperatura de 4 canales Extech SDL200 [6]	51
15.	Entradas de los cuatro canales de conexión para los termopares del equipo Extech SDL200 [6]	52
16.	Multímetro digital completo con capacidad de medición de temperatura [8]	53
17.	Termopares (Termocuplas) [9]	54
18.	MI de rotor bobinado utilizada en el estudio	55
19.	Datos de placa MI de rotor bobinado utilizado en el estudio .	56
20.	Parámetros del Modelo eléctrico de la máquina de inducción trifásica	58
21.	Borneras de conexión para el estator y rotor de la MI	61
22.	Termopares tipo K colocados en la MI de rotor bobinado . . .	62
23.	Pantalla configurada del equipo Extech SDL200 para la medición de el primer ensayo en c.c	63
24.	Diagrama de conexión para la prueba en CC con inyección de corriente en el estator	64
25.	Temperatura estator, rotor y ambiente prueba uno en DC. . .	65
26.	Temperatura estator, rotor y ambiente para la prueba dos en DC	69
27.	Circuito térmico simplificado para el estator	71
28.	Circuito térmico simplificado para el rotor	72
29.	Diagrama de conexión para la prueba 3 en AC	75
30.	Temperatura en el estator y temperatura ambiente prueba tres en AC.	76
31.	Diagrama de conexión para la prueba cuatro en AC	78
32.	Temperatura en el estator y ambiente en la prueba cuatro en AC.	79
33.	Modelo térmico de 2do orden de la MI en ATP Draw	82
34.	Curvas de Temperatura en el estator y en el rotor	83
35.	Curva temperatura en el estator simulación primer ensayo. . .	83
36.	Curva temperatura en el rotor simulación segundo ensayo . . .	84
37.	Curva temperatura en el estator motor en vacío.	85
38.	Curva temperatura en el estator motor con carga.	86
39.	Montaje prueba 1 (desde el lado del estator)	94
40.	Valores obtenidos de temperatura en el estator, rotor y temperatura ambiente en la prueba 1.	95
41.	Montaje prueba 2 (desde el lado del rotor)	96

42.	Valores obtenidos de temperatura en el estator, rotor y temperatura ambiente en la prueba 2.	97
43.	Montaje prueba 3 motor en vacío	98
44.	Valores totales obtenidos de temperatura en el estator y temperatura ambiente en la prueba 3 en AC.	99
45.	Montaje prueba 4 motor con carga	100
46.	Valores obtenidos de temperatura en el estator y temperatura ambiente en la prueba 4 en AC.	101
47.	Tomas de temperatura sensor infrarrojo FLUKE	102

Índice de tablas

1.	Caracterización de las pérdidas en las máquinas eléctricas y su dependencia de la temperatura	36
2.	Datos de placa de la máquina.	56
3.	Bases del sistema	56
4.	Valores iniciales para obtener los parámetros del modelo eléctrico	57
5.	Valores de Vacío	57
6.	Valores finales corriente, impedancia y Par	57
7.	Parámetros obtenidos en los cálculos del modelo eléctrico de la máquina.	57
8.	Parámetros obtenidos en los cálculos de la prueba de vacío a la máquina.	58
9.	Parámetros obtenidos en los cálculos de la prueba de rotor bloqueado a la máquina.	59
10.	Valores obtenidos en laboratorio en la prueba de vacío y rotor bloqueado	60
11.	Valores obtenidos del incremento térmico y constante de tiempo en la prueba uno en DC	67
12.	Valores obtenidos del incremento térmico y constante de tiempo en la prueba 2 en CC	70
13.	Valores obtenidos del incremento térmico y constante de tiempo en la prueba tres en CA	77
14.	Valores obtenidos del incremento térmico y constante de tiempo en la prueba 4 en AC	80
15.	Parámetros térmicos ingresados en ATP Draw	82

16.	Datos obtenidos en laboratorio y simulación Ensayos uno y dos en c.c	85
17.	Resultados obtenidos en laboratorio y simulación Ensayo 3 en vacío	86
18.	Resultados obtenidos en laboratorio y simulación Ensayo 4 motor con carga	87

1. Introducción

En este proyecto, se desarrolla un modelo térmico para la máquina de inducción de rotor devanado, junto con la determinación de los parámetros correspondientes, a partir de ensayos térmicos y eléctricos realizados en el laboratorio.

La sobrecarga térmica puede tener diversas causas y puede ocurrir en diferentes modos de funcionamiento. Puede ser de corta duración cuando el motor opera en condiciones transitorias, como arranques o paradas, o cuando se produce un fallo de aislamiento. La sobrecarga térmica también puede ocurrir durante el estado estacionario, debido a una sobrecarga en el motor o cuando funciona con una tensión de alimentación desequilibrada. Además, el deficiente mecanismo de refrigeración o una temperatura ambiente elevada también pueden contribuir a la sobrecarga térmica. Los parámetros normalmente controlados en las máquinas eléctricas son la tensión en los terminales, la corriente y la velocidad del rotor. En algunos casos, especialmente en máquinas de gran tamaño (>50 kW), también se mide la temperatura de las bobinas.

Los principales objetivos de la gestión térmica son proteger la máquina y lograr un funcionamiento eficiente. Al mismo tiempo, la fiabilidad y la durabilidad mejorada son objetivos importantes que se pueden obtener mediante la gestión térmica del convertidor. En este proyecto se propone desarrollar un modelo térmico para supervisar las temperaturas de los componentes cruciales durante el funcionamiento de la máquina. Este modelo se integrará en el microcontrolador del inversor, lo que permitirá implementar algoritmos inteligentes y de fácil manejo. De esta manera, se podrá lograr un control más preciso y eficiente del sistema.

El presente proyecto tiene como objetivo desarrollar un modelo que permita el control y la protección térmica de la máquina de inducción eléctrica utilizada en este estudio. Para lograrlo, es necesario recopilar datos relevantes sobre el rendimiento y funcionamiento previo de la máquina, ya que podría haber experimentado sobrecargas que resultaron en sobrecalentamientos. Es fundamental diseñar un modelo que represente estas perturbaciones en la máquina y que permita corregirlas y evitar alteraciones de temperatura indeseables en el equipo eléctrico.

La implementación de un sistema de control y protección térmica efectivo es crucial para garantizar la operación segura y eficiente de la máquina de inducción. Al supervisar y regular de manera precisa la temperatura, se

pueden prevenir daños en los componentes y maximizar la vida útil de la máquina. Además, se busca evitar situaciones que puedan comprometer su rendimiento y seguridad, como el sobrecalentamiento excesivo.

El desarrollo de un modelo adecuado permite identificar y mitigar las condiciones que pueden generar sobrecargas térmicas en la máquina de inducción. Esto se logra mediante la implementación de estrategias de control que ajusten los parámetros operativos en tiempo real, evitando así situaciones de riesgo.

En resumen, este proyecto se justifica por la necesidad de contar con un modelo de control y protección térmica que asegure el correcto funcionamiento y la integridad de la máquina de inducción eléctrica. Mediante la implementación de este modelo, se podrán corregir y prevenir alteraciones de temperatura no deseadas, garantizando así una operación más segura y eficiente del equipo.

1.1. Antecedentes

A lo largo de los años, los motores eléctricos han experimentado una notable evolución y continúan desempeñando un papel fundamental y progresivo en la sociedad actual.

Uno de los científicos clave en el avance del electromagnetismo fue el británico Michael Faraday. En 1813, comenzó sus trabajos junto a su mentor, el químico Humphry Davy, quien realizó importantes descubrimientos en el campo de la electrólisis. Fue en este contexto donde Faraday comenzó a desarrollar sus primeros experimentos [10]. En 1821, presentó sus investigaciones sobre el electromagnetismo y la rotación electromagnética, basándose en los descubrimientos de Hans Christian Ørsted sobre los campos magnéticos generados por corrientes eléctricas. Utilizando estos conocimientos, Faraday logró que un metal se moviera circularmente alrededor de un campo electromagnético, desarrollando así el primer motor eléctrico [10].

Cuando el motor de inducción es alimentado por un sistema de tensiones trifásico desequilibrado, las corrientes en las fases del motor serán diferentes y producen campos magnéticos pulsantes de diferente magnitud en cada fase. Por consecuencia, en el entre-hierro del motor se obtienen dos campos giratorios, un flujo magnético giratorio en el sentido de giro del motor (secuencia positiva) y otro en sentido opuesto al giro del motor (secuencia negativa), obteniéndose como resultante un campo elíptico. Consecuentemente para un determinado porcentaje de desequilibrio de tensión y una carga dada, las

corrientes en las fases y la elevación de temperatura son mucho mayores que cuando opera bajo las mismas condiciones de carga pero con tensiones equilibradas, afectando por lo tanto el desempeño del motor.

El efecto del desequilibrio de tensiones sobre el motor ha sido estudiado por varios autores, destacando los principales efectos sobre el motor: corrientes desequilibradas en los bobinados, elevación de temperatura en el devanado, incremento de las pérdidas, disminución de la potencia y el par, pulsaciones del par, reducción de la velocidad, vibraciones fundamentalmente a una frecuencia igual al doble de la frecuencia nominal, etc. Estos estudios generalmente están centrados en los efectos causados por la componente de tensión de secuencia negativa [11].

El campo de la investigación en proyectos eléctricos para la innovación en el ámbito de la electricidad ha experimentado un crecimiento constante, planteando proyectos que cumplen su función y facilitan su portabilidad y eficiencia. En el marco de este trabajo, se propone desarrollar un modelo que controle el impacto térmico en las máquinas eléctricas, específicamente en la máquina de inducción. Es importante destacar que, al controlar la temperatura, no siempre es posible detectar las fallas o averías que pueden ocurrir en los componentes de la máquina relacionados con la refrigeración, ya que el aumento de temperatura puede deberse a fallas en el ventilador, la carcasa, los conductos o las salidas de aire. Además, existen diversas condiciones que pueden afectar la temperatura, como paradas repentinas, sobrecargas y condiciones de refrigeración perturbadoras [12, 13].

Los modelos térmicos permiten al operario obtener una descripción precisa de los procesos térmicos en estas máquinas, así como determinar la potencia de salida máxima permitida en los equipos. También se analizan los parámetros que afectan la transferencia de calor y las medidas para la protección térmica de la máquina eléctrica utilizada en el planteamiento del modelo [14].

Entre los métodos de protección térmica que se pueden aplicar, la termografía se destaca como un diagnóstico no invasivo y eficaz. Su aplicación en pruebas de máquinas eléctricas depende en gran medida del costo de las cámaras disponibles en el mercado. Sin embargo, es importante resaltar que la termografía es una de las tecnologías más utilizadas en investigaciones de máquinas eléctricas y, por lo tanto, en sus servicios de mantenimiento [15].

1.2. Objetivos

1.3. Objetivo general

- Desarrollar un modelo térmico de la máquina de inducción que permita determinar la temperatura de los puntos críticos en función de su operación.

1.4. Objetivos específicos

- Realizar un modelo que permita detectar temperatura en las máquinas de inducción con la finalidad de verificar su correcto funcionamiento.
- Determinar los parámetros del modelo térmico de la máquina de inducción.
- Utilizar el modelo desarrollado y los parámetros obtenidos para identificar temperaturas críticas de la máquina de inducción en diferentes regímenes de operación.
- Validar el modelo térmico desarrollado de la máquina de inducción mediante análisis y pruebas realizados en laboratorio.

2. Metodología y Marco Teórico

Para alcanzar el objetivo general de este proyecto se plantea utilizar una metodología experimental que permita recopilar la información de los parámetros térmicos del modelo desarrollado y obtener las temperaturas durante el funcionamiento. El modelo matemático de la máquina se determinó mediante el análisis termodinámico del convertidor y las fuentes de pérdidas a partir de un modelo detallado de régimen permanente de la máquina de inducción en condiciones des balanceadas, con armónicas y con deficiencias en la refrigeración.

En el proceso de este proyecto se debe proceder con las siguientes etapas:

- Primera etapa:

Se deberá determinar los parámetros del modelo térmico de la máquina como las impedancias y capacitancias térmicas.

- Segunda etapa:
Análisis de potencias y determinación de pérdidas dentro de las máquinas de inducción.
- Tercera etapa:
Se realizara diferentes ensayos a la máquina y así obtener las diferentes temperaturas durante su funcionamiento.
- Cuarta etapa:
Validación del modelo desarrollo para la identificación de las temperaturas en diferentes regímenes de operación de la máquina

Los equipos necesarios para la realización de este proyecto fueron suministrados por el Grupo de Investigación en Energía (GIE) y las licencias de los programas utilizados estarán a cargo de la Universidad Politécnica Salesiana quien realiza los pagos anuales. El resto de los costos serán a cargo de los autores del proyecto en su totalidad.

Los recursos humanos de laboratorio estuvieron a cargo de la Universidad Politécnica Salesiana y del grupo GIE.

2.1. Marco Teórico

2.1.1. Máquinas eléctricas

Una máquina eléctrica es un dispositivo que puede convertir energía mecánica en energía eléctrica o energía eléctrica en energía mecánica. Cuando este dispositivo se utiliza para convertir energía mecánica en energía eléctrica se denomina generador, y cuando convierte energía eléctrica en energía mecánica se llama motor. Puesto que puede convertir energía eléctrica en mecánica o viceversa, una máquina eléctrica se puede utilizar como generador o como motor. Casi todos los motores y generadores útiles convierten la energía de una a otra forma a través de la acción de campos magnéticos. En este proyecto se consideran las máquinas que utilizan campos magnéticos para tales conversiones [16].

El transformador es un dispositivo eléctrico estrechamente relacionado con las máquinas eléctricas. Convierte energía eléctrica ca a un nivel de voltaje a energía eléctrica ca a otro nivel de voltaje. Como los transformadores

operan sobre los mismos principios que los generadores y los motores, es decir, utilizan la acción de un campo magnético para realizar el cambio de nivel de voltaje, por lo general se estudian junto con éstos [16].

Estos tres tipos de equipos eléctricos se encuentran en todos los ámbitos de la vida cotidiana moderna. En el hogar, los motores eléctricos hacen funcionar a los refrigeradores, congeladores, aspiradoras, licuadoras, equipos de aire acondicionado, ventiladores y muchos otros aparatos similares. En los talleres los motores suministran la fuerza motriz para casi todas las herramientas. En consecuencia, los generadores son necesarios para suministrar la energía que requieren todos estos motores [16].

2.1.2. Máquina de inducción

La máquina de inducción es un convertidor electromecánico reversible, capaz de convertir energía eléctrica en energía mecánica (energía cinética rotativa), o energía mecánica en energía eléctrica (aplicación como generador). Sin embargo, posee muchas desventajas como generador, por lo que pocas veces se utiliza como tal. Por esta razón, las máquinas de inducción se refieren a los motores de inducción. Este tipo de motor eléctrico es también denominado motor asincrónico trifásico, porque bajo condiciones de carga, la velocidad de giro del motor es inferior a la sincrónica [17].

Su invención se le debe a Tesla, a finales del siglo XIX y nace como solución al problema de utilizar la corriente alterna. Tesla había sugerido la idea de las ventajas que poseía la corriente alterna sobre la corriente continua, cuya dificultad de transmisión para la época, comenzaban a ser evidente. La defensa de la corriente continua era realizada por Edison, famoso inventor norteamericano que contaba con un inmenso prestigio. Sin embargo, la visión comercial de Westinghouse impulsó las ideas de Tesla para la instalación de la primera gran central hidro-eléctrica, que se realizó en las Cataratas del Niágara, utilizando generadores de corriente alterna, que utilizaban transformadores para elevar la tensión, transmitían mediante líneas en alta tensión y la reducen para alimentar a los motores de inducción que accionan la creciente carga industrial. Desde ese crucial momento y hasta la actualidad, la máquina de inducción ha ido copando la inmensa mayoría de aplicaciones en la industria, en el comercio y en el hogar. Las razones fundamentales que justifican la aplicación masiva de la máquina de inducción hoy en día, residen en su sencillez constructiva y en la robustez que ofrecen estos convertidores durante la operación en regímenes de alta sollicitación. Estos motores

requieren un mantenimiento mínimo, pueden operar convenientemente en ambientes peligrosos y tienen una tasa de falla muy reducida. Algunas limitaciones tales como el ajuste de la característica par-velocidad, la intensidad de las corrientes durante el arranque, la regulación de velocidad y el rendimiento, han sido resueltas o mejoradas con diseños ingeniosos que incorporan controladores electrónicos de potencia [3].

En una máquina de inducción convencional toda la energía eléctrica fluye hacia o desde el estator. Los flujos generados por las corrientes de este devanado generan un campo magnético rotatorio que estimula a los conductores del rotor y de esta forma se obtiene sobre ellos fuerza electromotriz inducida que es utilizada para producir la circulación de corrientes en el rotor. Al interactuar el campo magnético rotatorio del estator con el campo originado por las corrientes que circulan en el rotor, se produce el par eléctrico. La máquina de inducción se alimenta con corriente alterna en el estator, de esta forma se produce el campo magnético rotatorio que posee una amplitud constante en el tiempo, pero varía en el espacio. La velocidad de giro del campo magnético rotatorio está definida por la frecuencia de las corrientes inyectadas en el estator de la máquina [3].



Figura 1: Máquina de inducción trifásica

Una metodología para la determinación de parámetros mediante ensayos consiste en hacer la estimación de carga a partir de los parámetros del motor de inducción, obteniendo éstos realizando un análisis en un motor de inducción con ensayos como son el ensayo de vacío y el ensayo de rotor bloqueado, El primero en vacío se lo realiza con el motor trabajando a su tensión nominal dejándolo girar libremente, sin ninguna carga acoplada a su eje, el segundo ensayo se realiza bloqueando el eje de la máquina impidiendo que gire por lo tanto la velocidad del rotor será nula.

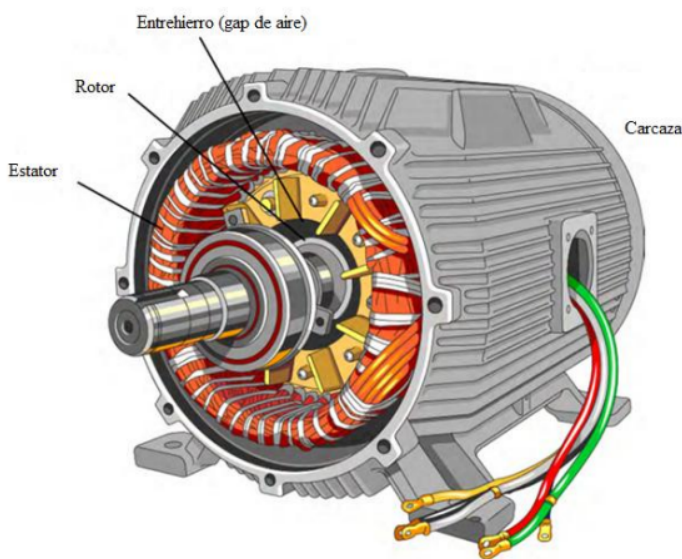


Figura 2: Partes principales motor de inducción trifásico [1]

En la Fig.2 se observa el estator como la parte fija del motor y que tiene la función de generar el campo magnético, el rotor es la parte móvil del motor que gira en el interior del estator, mientras que el entrehierro es el espacio de aire que separa al estator del rotor posibilitando que exista el movimiento y finalmente la carcasa tiene la función de proteger las partes internas del motor y también poseen una vía para disipar el calor del equipo por lo general son fabricadas en acero fundido.

Para una mejor comprensión de las partes del motor de inducción en la Fig. 3 se muestra un despiece total de todas las partes de la máquina de inducción.

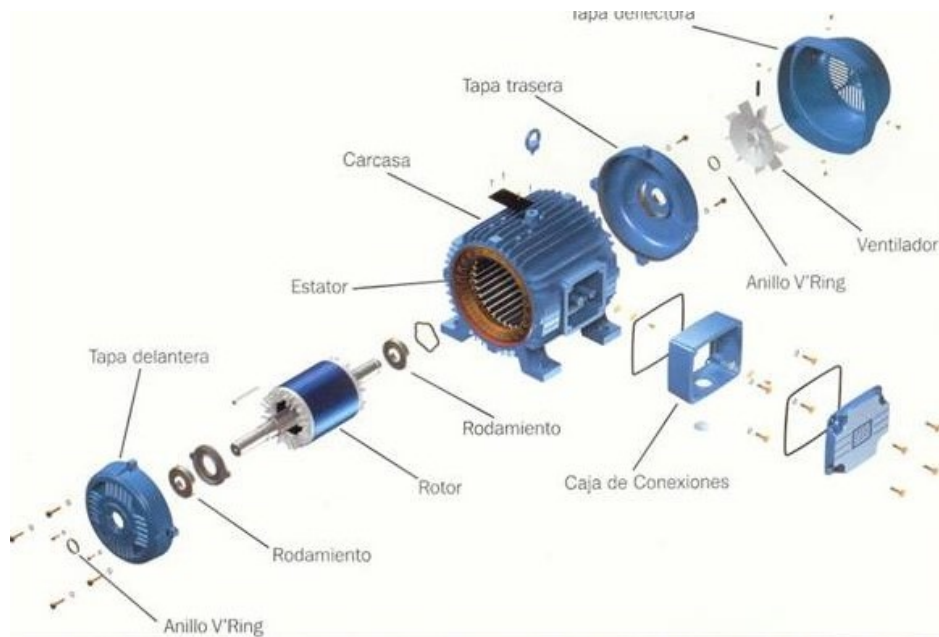


Figura 3: Despiece de la maquina de inducción de jaula de ardilla [2]

2.1.3. Modelo de la máquina de inducción

En la Fig. 4 se observa el esquema básico de las bobinas de una máquina de inducción cuyo rotor y estator son trifásicos. En general el modelo se puede establecer para un número general de fases en el estator y otro en el rotor. Como la mayoría de los motores de inducción de uso industrial son trifásicos en el estator, se realiza el modelo para un caso particular donde el rotor y el estator son trifásicos. Normalmente, las bobinas rotóricas se encuentran en cortocircuito y en el estator se aplica un sistema trifásico y balanceado de tensiones sinusoidales. En los modelos convencionales de la máquina de inducción se desprecian los efectos que el espacio entre las bobinas, la distribución de los devanados, las excentricidades estáticas y dinámicas y en ciertos casos las pérdidas en el hierro y las pérdidas mecánicas. Se observa en la Fig. 4 el comportamiento de la máquina de inducción en el sistema de coordenadas primitivas [3].

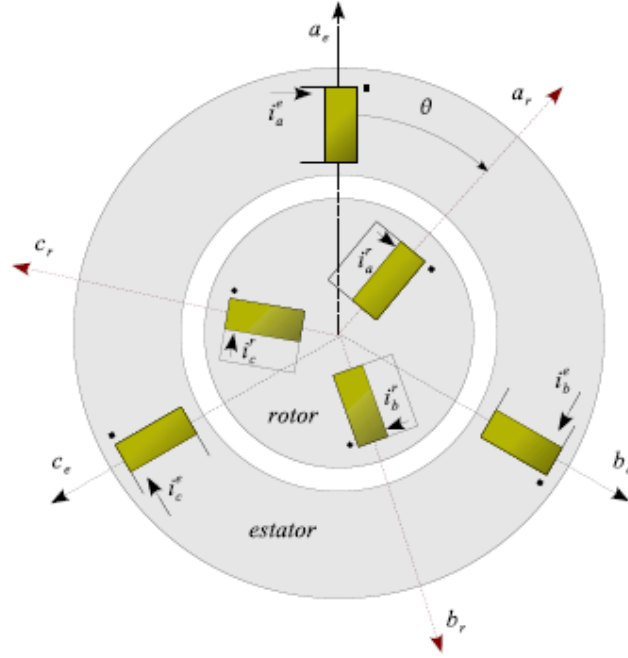


Figura 4: Diagrama esquemático de las bobinas de una máquina de inducción trifásica en el rotor y estator [3]

2.1.4. Modelo de la máquina de inducción en coordenadas primitivas

Las ecuaciones diferenciales que rigen el comportamiento de la máquina de inducción en el sistema de coordenadas indicado en la Fig. 4 son [3]:

$$[v] = [R] [i] + p[\lambda] = [R] [i] + [L(\theta)] p[i] + \dot{\theta} [\tau(\theta)] [i], \quad (1)$$

$$T_e - T_m = \frac{1}{2} [i]^t [\tau] [i] - T_m = J\ddot{\theta} + p\dot{\theta}, \quad (2)$$

donde:

$$[v] = \begin{bmatrix} [v_e] \\ [v_r] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [v_a^e & v_b^e & v_c^e]^t \\ [v_a^r & v_b^r & v_c^r]^t \end{bmatrix}; [i] = \begin{bmatrix} [i_e] \\ [i_r] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [i_a^e & i_b^e & i_c^e]^t \\ [i_a^r & i_b^r & i_c^r]^t \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$[\lambda] = \begin{bmatrix} [\lambda_e] \\ [\lambda_r] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\lambda_a^e & \lambda_b^e & \lambda_c^e]^t \\ [\lambda_a^r & \lambda_b^r & \lambda_c^r]^t \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$[R] = \begin{bmatrix} [R_{ee}] & [R_{er}] \\ [R_{re}] & [R_{rr}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_e [I] & [0] \\ [0] & R_r [I] \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$[L(\theta)] = \begin{bmatrix} L_{\sigma e} [I] + L_{me} [S] & L_{er} [C(\theta)] \\ L_{er} [C(\theta)]^t & L_{\sigma r} [I] + L_{mr} [S] \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$[\tau(\theta)] = \begin{bmatrix} [0] & L_{er} \frac{d}{d\theta} [C(\theta)] \\ L_{er} \frac{d}{d\theta} [C(\theta)]^t & [0] \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$[I] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; [S] = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & 1 & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix}; [0] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$[C(\theta)] = \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta + \frac{4\pi}{3} \right) \\ \cos \left(\theta + \frac{4\pi}{3} \right) & \cos \theta & \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta + \frac{4\pi}{3} \right) & \cos \theta \end{bmatrix}, \quad (9)$$

Los parámetros del comportamiento del modulo de la maquina de inducción en el sistema de coordenadas primitivas son:

R_e es la resistencia de cada una de las bobinas del estator

R_r es la resistencia de cada una de las bobinas del rotor

$L_{\sigma e}$ es la inductancia de dispersión del estator

$L_{\sigma r}$ es la inductancia de dispersión del rotor

L_{me} es la inductancia de magnetización del estator

L_{mr} es la inductancia de magnetización del rotor

L_{er} es la inductancia mutua de acoplamiento estator-rotor

2.1.5. Vectores espaciales

El sistema conformado por las seis ecuaciones de tensión planteadas en (1) y el balance de par expresado en (2) representan el comportamiento dinámico de la maquina de inducción, pero la dependencia de la posición angular θ complica notablemente la solución practica de este modelo y la técnica de transformación de coordenadas es conveniente. La transformación a vectores espaciales permite representar un sistema de tensiones, corrientes o flujos trifásicos mediante un vector en el espacio, cuya posición y magnitud dependen del tiempo [3].

La transformación a vectores espaciales se define como:

$$x_e = \sqrt{\frac{2}{3}} \{x_a + \alpha x_b + \alpha^2 x_c\}, \quad (10)$$

donde: $\alpha = \exp(\frac{2\pi}{3})$.

Transformando a vectores espaciales las ecuaciones (1) y (2), utilizando (10), se obtiene [3, 18]:

$$\begin{bmatrix} V_e \\ V_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_e & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_e \\ i_r \end{bmatrix} + p \left[\begin{bmatrix} L_e & M_{er}e^{j\theta} \\ M_{er}e^{-j\theta} & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_e \\ i_r \end{bmatrix} \right], \quad (11)$$

$$M_{er} \Im m \{ i_e (i_r e^{j\theta})^* \} - T_m (\dot{\theta}) = J\ddot{\theta} + p\dot{\theta} \quad (12)$$

2.1.6. Vectores espaciales referidos al estator

El modelo descrito en las expresiones (11) y (12), simplifica notablemente las expresiones (1) y (2), al representar las magnitudes trifásicas mediante vectores espaciales referidos al estator. Por una parte el sistema se ha reducido de las siete ecuaciones diferenciales iniciales a tres y la dependencia en la posición angular θ se ha simplificado a su aparición en matrices cuya dimensión es de 2×2 . Para eliminar la dependencia en la posición angular θ , se refieren las variables del rotor al sistema de referencia del estator utilizando la siguiente transformación: [3, 18, 19]

$$x_r^e = x_r e^{j\theta} \quad (13)$$

Utilizando transformación (13) en el modelo definido en las expresiones (11) y (12), se obtiene el modelo de la máquina de inducción en vectores espaciales referidos al estator [3],

$$\begin{bmatrix} V_e \\ V_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_e & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_e \\ i_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_e & M_{er} \\ M_{er} & L_r \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_e \\ i_r^e \end{bmatrix} - j\omega_r \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ M_{er} & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_e \\ i_r^e \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$M_{er} \mathfrak{Im} \{i_e (i_r^e)^*\} - T_m (\dot{\theta}) = J\omega_r + p\omega_r \quad (15)$$

El modelo descrito en (15) es independiente de la posición angular θ , que es variable en el tiempo aun en el caso particular de la operación en régimen permanente y esta dependencia es reemplazada por la velocidad angular ω_r cuyo comportamiento temporal varía más lentamente.

2.1.7. Régimen Permanente

A partir del análisis al modelo descrito anteriormente en vectores espaciales se obtiene lo siguiente:

$$\begin{bmatrix} V_e \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_e + j\omega_e L_e & j\omega_e M_{er} \\ j(\omega_e - \omega_m) M_{er} & R_r + j(\omega_e - \omega_m) L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_e \\ i_r \end{bmatrix} \quad (16)$$

Para determinar el circuito equivalente de la maquina de inducción en régimen permanente a partir de (16), es necesario dividir la segunda ecuación por el deslizamiento:

$$s = \frac{\omega_e - \omega_m}{\omega_e} \quad (17)$$

$$\begin{bmatrix} V_e \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_e + j\omega_e L_e & j\omega_e M_{er} \\ j\omega_e M_{er} & \frac{R_r}{s} + j\omega_e L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_e \\ i_r \end{bmatrix} \quad (18)$$

En la Fig. 5 se presenta el circuito equivalente de la máquina de inducción en régimen permanente [3].

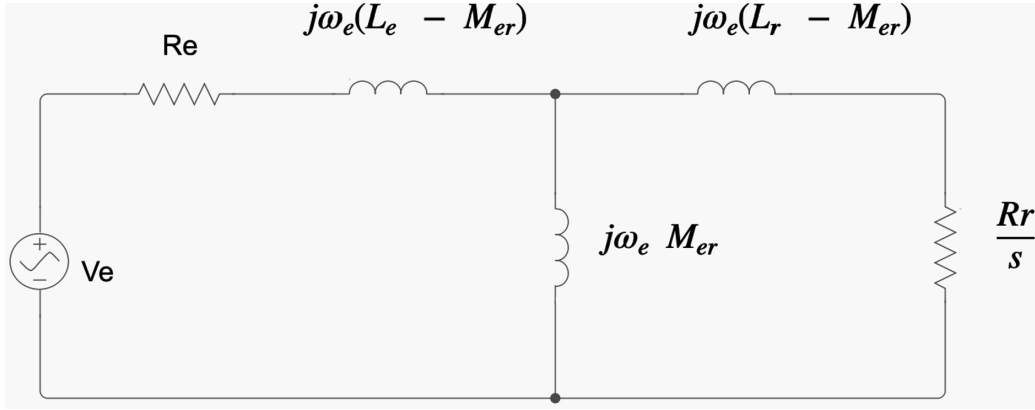


Figura 5: Modelo de la máquina de inducción en régimen permanente

El par eléctrico en régimen permanente se calcula de la siguiente manera:

$$T_e = 3M_{er}I_eI_r \text{sen}(\vartheta_e - \vartheta_r) \quad (19)$$

La ecuación correspondiente al circuito rotorico en el sistema 18 relaciona directamente corrientes del estator y del rotor

$$I_e e^{j(\vartheta_e - \vartheta_r)} = j \frac{\left(\frac{R_r}{s} + j\omega_e L_r\right)}{\omega_e M_{er}} I_r \rightarrow I_e \text{sen}(\vartheta_e - \vartheta_r) = \frac{R_r}{s\omega_e M_{er}} I_r \quad (20)$$

Al sustituir la expresión 20 en la ecuación del par eléctrico 19, se obtiene el par eléctrico en función de la corriente del rotor I_r , el deslizamiento s , la resistencia del rotor R_r y la velocidad sincrónica ω_s

$$T_e = 3 \frac{R_r}{\omega_e s} I_r^2 \quad (21)$$

La expresión (21) se puede obtener directamente del circuito equivalente de la Fig. 5, cuando se calcula tres veces la potencia entregada a la resistencia $\frac{R_r}{s}$ y se divide por la velocidad sincrónica ω_e .

En la hipótesis del modelo se han despreciado la pérdidas en el hierro de la máquina. Es posible considerar estas pérdidas colocando una resistencia en paralelo con la fuerza electromotriz producida por el flujo de magnetización. También se puede recordar que las inductancias L_e y L_r están compuestas de dos partes, dispersión y magnetización. [3]

Utilizando el modelo (11), se puede establecer lo siguiente:

$$L_e - M_{er} = L_{de} + \frac{3}{2}L_{er} - \frac{3}{2}L_{er} = L_{de} \quad (22)$$

$$L_r - M_{er} = L_{dr} + \frac{3}{2}L_{er} - \frac{3}{2}L_{er} = L_{dr} \quad (23)$$

definiendo $X_{de} = \omega_e L_{de}$, $X_{dr} = \omega_e L_{dr}$ y $X_m = \omega_e M_{er}$, y agregar la resistencia de magnetización en paralelo con la reactancia de magnetización y separar la resistencia $\frac{R_r}{s}$ en dos componentes, una R_r que representa las pérdidas óhmicas del circuito rotórico y $\frac{1-s}{s}R_r$ que representa la potencia transferida al rotor que no se consume en pérdidas, se puede obtener el modelo clásico de la máquina de inducción en régimen permanente, tal como se muestra en la Fig. 6

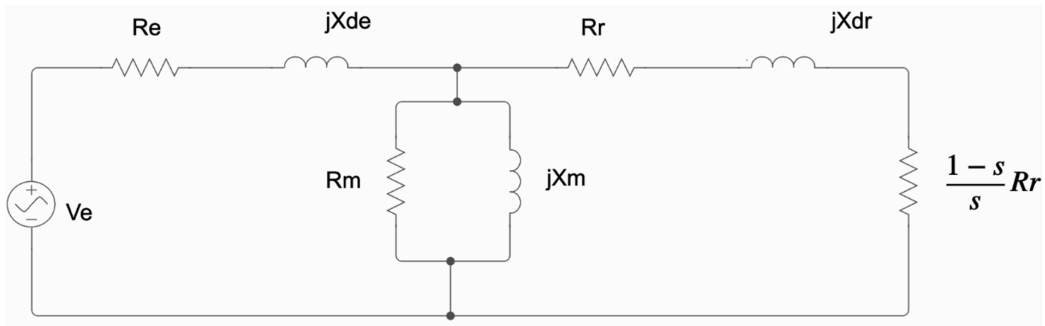


Figura 6: Modelo eléctrico clásico de la máquina de inducción trifásica

2.1.8. Ensayos para obtener las perdidas de potencia en el motor de inducción

■ Ensayo de Vacío

En este ensayo el motor gira en vacío sin carga en su eje y funcionando a su tensión nominal establecida por el equipo y luego de un momento se realizaran las tomas de datos de voltaje, corriente y potencia las cuales representa las perdidas de potencia en el mismo.

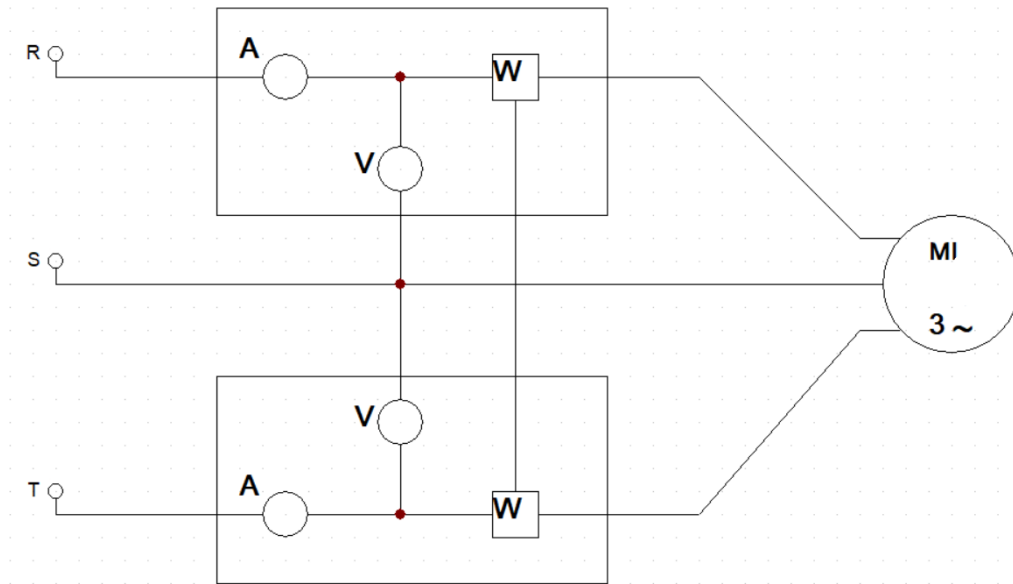


Figura 7: Diagrama de conexión ensayo en vacío

▪ Ensayo de Rotor Bloqueado

En este ensayo el esquema de conexión es el mismo que en vacío solo que ahora se bloqueara el eje del motor impidiendo su giro por un pequeño tiempo esto solo hasta tomar datos de Voltaje, Corriente y Potencia ya que puede ocurrir desperfectos en el rotor de la máquina, por lo tanto la velocidad del rotor será nula y el deslizamiento igual a 1.

2.1.9. Ecuaciones de la maquina de inducción

Corriente Base

$$I_{base} = \frac{S_{base}}{\sqrt{3}V_{base}} \quad (24)$$

Impedancia Base

$$Z_{base} = \frac{V_{base}^2}{S_{base}} \quad (25)$$

Inominal

$$I_n = \frac{I_n}{I_{Base}} = I_n \angle -\cos^{-1}(\phi) = \quad (26)$$

$$I_m = \frac{1}{3}I_n \longrightarrow I_m = \frac{I_m \text{ en } A}{I_{Base}} \quad (27)$$

Calculo de V_{th}

$$V_{th} = \frac{j3}{j3 + j0,1} \quad (28)$$

Potencia de entrada

$$P_e = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos \phi \quad (29)$$

Eficiencia

$$\eta = \frac{S_{Base}}{P_e} \quad (30)$$

N. polos

$$p = \frac{60f}{n} \quad (31)$$

Velocidad sincrónica

$$ws = \frac{60f}{p} \quad (32)$$

Deslizamiento

$$s = \frac{ws - wm}{ws} \quad (33)$$

Perdidas:

$$1 - \eta =: 1 - \eta - (s \cdot 2) = \quad (34)$$

Perdidas totales

$$Pp = \frac{Perdidas}{2} = P_0 \quad (35)$$

$$a \ 50Hz P_{Fe} = Pp \Rightarrow I_m = S_o$$

Potencia Q_0

$$Q_o = \sqrt{S_o^2 - P_o^2} \quad (36)$$

Reactancia de magnetización

$$X_m = \frac{V_{th}^2}{Q_o} \quad (37)$$

Resistencia de magnetización

$$R_m = \frac{V_{th}^2}{P_o} \quad (38)$$

$$I_o = \frac{V_{th}}{R_m} + \frac{V_{th}}{jX_m} \quad (39)$$

I rotor nominal I_{rn}

$$I_{rn} = I_{en} - I_o, \quad I_{en} = I_n \quad (40)$$

Impedancia rotor Z_r

$$Z_r = \frac{V_{th}}{I_{rn}} \quad (41)$$

Par nominal T_n

$$T_n = \frac{P_n}{\omega m} \quad (42)$$

Reactancia de dispersión estator y rotor

$$X_e = X_r = \frac{\text{imag } Z_r}{2} \quad (43)$$

R Rotor en pu :

$$R_r = \frac{V_{th}^2 \cdot s_n}{T_n} \quad (44)$$

R Estator en pu :

$$R_e = \text{real } Z_r - \frac{R_r}{s_n} \quad (45)$$

Prueba de vacío:

$$Z_m = \frac{R_m j X_m}{R_m + j X_m} + R_e + j X_e = 0,1846 + j2,06 = 2,0682 \angle 84,87^\circ \quad (46)$$

donde:

R_m es la resistencia de la rama de magnetización

X_m es la reactancia de la rama de magnetización

R_e es la resistencia del estator

X_e es la reactancia de dispersión del estator

Corriente de vacío I_o en pu

$$I_o = \frac{V}{Z_m} \quad (47)$$

$$I_o \text{ en } A = I_o \text{ en } pu \cdot I_{base} \quad (48)$$

Potencia en vació

$$P_o \text{ en pu} = V_o \cdot I_o \cdot \cos\phi \quad (49)$$

$$P_o \text{ en W} = P_o \text{ en pu} \cdot S_{base} \quad (50)$$

Voltaje en vació

$$V_o = V_{base} \quad (51)$$

Prueba de Rotor Bloqueado:

$$Z_m = \frac{R_m j X_m}{R_m + j X_m} \quad (52)$$

$$Z_{Rb} = \frac{Z_r \cdot Z_m}{Z_r + Z_m} + Z_e \quad (53)$$

donde:

R_m es la resistencia de la rama de magnetización

X_m es la reactancia de la rama de magnetización

Z_m es la impedancia de la rama de magnetización

Z_r es la impedancia del rotor

Z_e es la impedancia del estator

Corriente de rotor bloqueado:

I_{Rb} en A

$$I_{Rb} = I_n \cdot I_{base} \quad (54)$$

Voltaje de rotor bloqueado:

V_{Rb} en pu

$$V_{Rb} = I_{rb} \cdot Z_{rb} \quad (55)$$

V_{Rb} en V

$$V_{Rb} = V_{Rb} \text{ en pu} \cdot V_{base} \quad (56)$$

Potencia de rotor bloqueado:

$$P_{Rb} \text{ en pu} = V_{Rb} \text{ en pu} \cdot I_n \cdot \cos(\theta) \quad (57)$$

$$P_{Rb} \text{ en W} = P_{Rb} \text{ en pu} \cdot S_{base} \quad (58)$$

2.1.10. Análisis teórico de las pérdidas en función de la temperatura en motores de inducción

Las pérdidas en las máquinas eléctricas se dividen en eléctricas, magnéticas y mecánicas. En la Tabla 1 se enumeran los efectos físicos de estos tipos de pérdidas y los correspondientes parámetros dependientes de la temperatura.

Tabla 1: Caracterización de las pérdidas en las máquinas eléctricas y su dependencia de la temperatura

Pérdidas	Causa de las Pérdidas	Parámetros dependientes de la temperatura
Pérdidas eléctricas	Corriente - calor	Resistencia del devanado eléctrico
Pérdidas magnéticas del hierro	Histéresis	curva de histéresis, flujo de imán permanente
	Corrientes parásitas	Resistencia eléctrica de la lámina de hierro, flujo del imán permanente
Pérdidas mecánicas	Ventilación, fricción	Viscosidad del lubricante en el rodamiento o cojinete

■ Pérdidas eléctricas:

Las pérdidas eléctricas o pérdidas del bobinado de las máquinas eléctricas en los motores de inducción dependen de la corriente de línea en el estator a través de la resistencia del bobinado del estator R_e y la corriente del rotor a través de la resistencia del rotor R_r .

La resistencia R_e del devanado del estator de los motores de inducción y síncronos es de cobre, el devanado del rotor de los motores de inducción es principalmente de aluminio [4].

■ Pérdidas en el hierro magnético

Las pérdidas en el núcleo del estator se dividen en pérdidas por histéresis y pérdidas por corrientes parásitas [4].

1) **Pérdidas por histéresis:** Al aumentar la temperatura se necesita menos energía de polarización para los dominios magnéticos debido al aumento del movimiento atómico. Como resultado, la remanencia B_R así

como la coercitividad H_C disminuyen en el núcleo de hierro magnéticamente blando [6]. Como se muestra en la Fig. 1, el ciclo de histéresis se contrae. Esto conduce a menores pérdidas de histéresis que son proporcionales al área dentro del bucle.

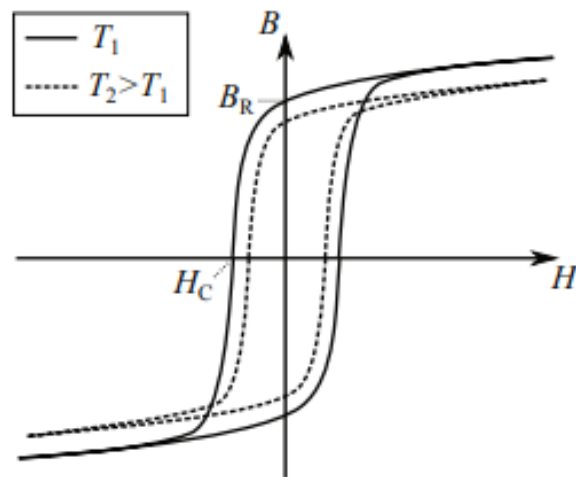


Figura 8: Ciclo de histéresis de un material magnético blando a diferentes temperaturas [4]

2) Pérdidas por corrientes parásitas: Las corrientes parásitas son el resultado de la tensión inducida. En consecuencia dependen de la resistencia eléctrica de las chapas de hierro y disminuyen con el aumento de la temperatura.

3) Flujo magnético del estator: La densidad de flujo magnético B tiene una influencia cuadrática en las pérdidas de hierro en el estator. En los motores de inducción, el flujo magnético depende de la tensión eléctrica y de la frecuencia y no depende de la temperatura [4].

▪ **Ventilación y pérdidas por fricción**

Si el motor contiene un ventilador las pérdidas por ventilación exterior forman parte de las pérdidas del motor. No obstante, estas pérdidas no dependen de la temperatura interior del motor. Las pérdidas por ventilación interior entre

el rotor y el estator suelen ser despreciables a velocidades estándar del motor [4].

Las pérdidas por fricción se originan en los cojinetes del rotor. La fricción en los cojinetes se reduce al aumentar la temperatura debido a la disminución de la viscosidad de los lubricantes.

En los motores de inducción, las pérdidas por ventilación y fricción pueden medirse por separado mediante el método definido en la norma DIN IEC 60034-2. En este método, la tensión del motor y, por tanto, las pérdidas por fricción pueden medirse por separado.

En un análisis teórico de las pérdidas del motor en función de la temperatura se podrá notar que, con el aumento de la temperatura del motor:

- **Las pérdidas en el bobinado aumentan,**
- **Las pérdidas en el hierro se reducen,**
- **Las pérdidas por fricción se reducen (debido a que la pequeña parte de la pérdidas totales, son insignificantes).**

2.2. Análisis térmico en la máquina eléctrica

2.2.1. Sobrecarga térmica en la máquina eléctrica

La sobrecarga térmica de los equipos de rotación del sistema eléctrico de los medios térmicos puede tener varias causas y puede ocurrir en diferentes modos de funcionamiento. La sobrecarga puede ser de corta duración cuando el motor funciona en condiciones transitorias (arranque, parada), o cuando se produce un fallo de aislamiento.

La sobrecarga térmica también puede producirse en estado estacionario. Puede ocurrir cuando el motor está sobrecargado o funciona con un suministro de voltajes desequilibrado. Los mecanismos de refrigeración deficientes o una temperatura ambiente elevada también contribuyen a la sobrecarga térmica. Algunas de las consecuencias de la sobrecarga térmica son el deterioro de componentes importantes del motor, como el aislamiento del bobinado, los rodamientos, los conductores y el núcleo [5].

La protección térmica del motor requiere la estimación o medición de la temperatura del motor. En general, los métodos para obtener la temperatura se pueden dividir en tres grupos [5]:

1. Medición directa de la temperatura, que suele realizarse mediante algún tipo de sensor de temperatura integrado [por ejemplo, termopares (TC), detector de resistencia (RTD) o un sensor de temperatura por infrarrojos];
2. Estimación de la temperatura basada en un modelo térmico, que suele incluir la estimación de las pérdidas del motor y algún tipo de modelo de transferencia de calor;
3. Estimación de la temperatura basada en parámetros, que suele apoyarse en la medición de una magnitud sensible a la temperatura, como la resistencia del devanado del estator [5].

2.2.2. Modelos térmicos

La técnica más utilizada en los relés de protección es la estimación de la temperatura basada en el modelo. Un modelo térmico requiere la determinación de las pérdidas de potencia en la máquina eléctrica y de los parámetros térmicos del modelo. Varios modelos térmicos de la máquina de inducción han sido propuestos y analizados hasta la actualidad en diferentes estudios. Un modelo de primer orden no siempre tiene la precisión requerida por el estudio planteado. Aumentar el orden del modelo puede aumentar la precisión de la predicción, pero también requiere más potencia de cálculo computacional y tiene el coste de un mayor número de parámetros que hay que estimar. Un modelo de segundo orden se utiliza a menudo como un compromiso entre complejidad y precisión [5].

La expresión matemática de un modelo térmico de segundo orden puede escribirse como [5].

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_s \\ \dot{\theta}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{\theta_s} + R_{\theta_{sr}}}{R_{\theta_s} R_{\theta_{sr}} C_{\theta_s}} & \frac{1}{R_{\theta_{sr}} C_{\theta_s}} \\ \frac{1}{R_{\theta_{sr}} C_{\theta_r}} & -\frac{R_{\theta_r} + R_{\theta_{sr}}}{R_{\theta_r} R_{\theta_{sr}} C_{\theta_r}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_s \\ \theta_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{P_{s.loss}}{C_{\theta_s}} \\ \frac{P_{r.loss}}{C_{\theta_r}} \end{bmatrix} \quad (59)$$

donde θ_s y θ_r son las temperaturas de los devanados del estator y del rotor; R_{θ_s} y R_{θ_r} son la resistencia térmica del estator y del rotor que representan la capacidad de disipación de calor al ambiente; $R_{\theta_{sr}}$ es la resistencia térmica entre el estator y el rotor; C_{θ_s} y C_{θ_r} son la capacitancia térmica del estator y del rotor que representan la capacidad del sistema para almacenar energía térmica; y $P_{s.loss}$ y $P_{r.loss}$ representan las pérdidas en el estator y el rotor, respectivamente. La ecuación para un modelo de primer orden es:

$$\dot{\theta}_i = -\frac{1}{R_\theta C_\theta} \theta_i + \frac{P_{loss}}{C_\theta} \quad (60)$$

donde θ_i es la temperatura estimada del devanado del estator; R_θ la resistencia térmica entre el devanado del estator y el ambiente; C_θ la capacitancia térmica entre el devanado del estator y el ambiente; y P_{loss} las pérdidas totales del motor.

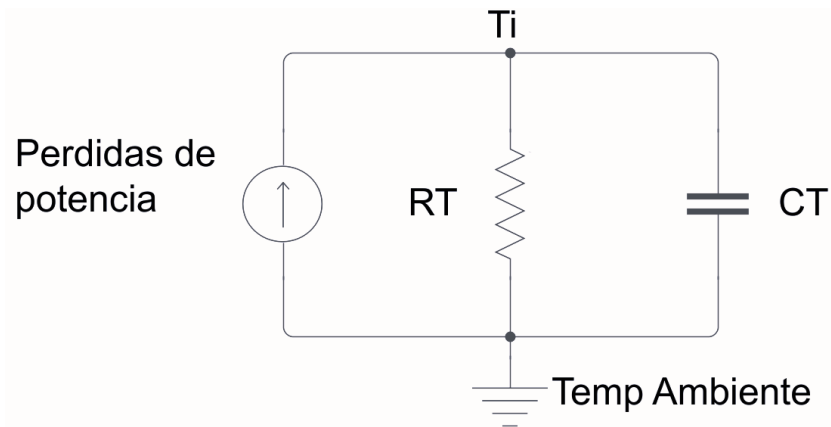


Figura 9: Modelo térmico de primer orden de la máquina de inducción [5]

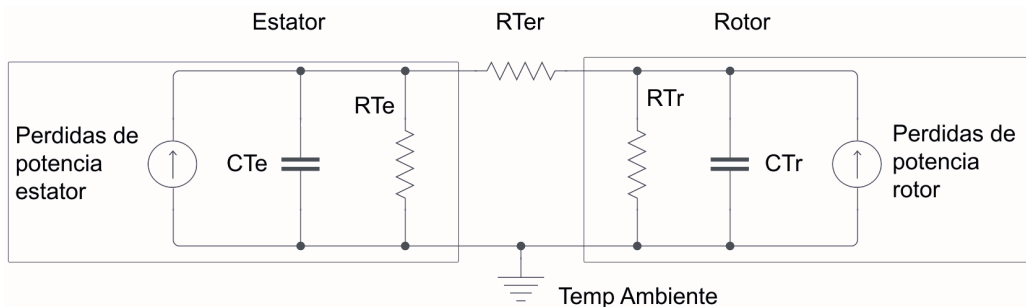


Figura 10: Modelo térmico de segundo orden de la máquina de inducción [5]

Este modelo de segundo orden puede adaptarse para su uso con cualquier máquina de inducción sin necesidad de disponer de información sobre el tamaño y las dimensiones de la máquina o las propiedades de los materiales. Además, los parámetros térmicos, como las capacitancias térmicas, resistencias térmicas y los coeficientes de transferencia de potencia, pueden determinarse mediante pruebas térmicas al rotor y estator de la máquina.

2.2.3. Estimación de las pérdidas del motor

La Fig. 11 muestra un diagrama de flujo de potencia que incluye las pérdidas de la máquina para los motores de inducción. Cada una de las pérdidas puede obtenerse por métodos de estimación o ensayos.

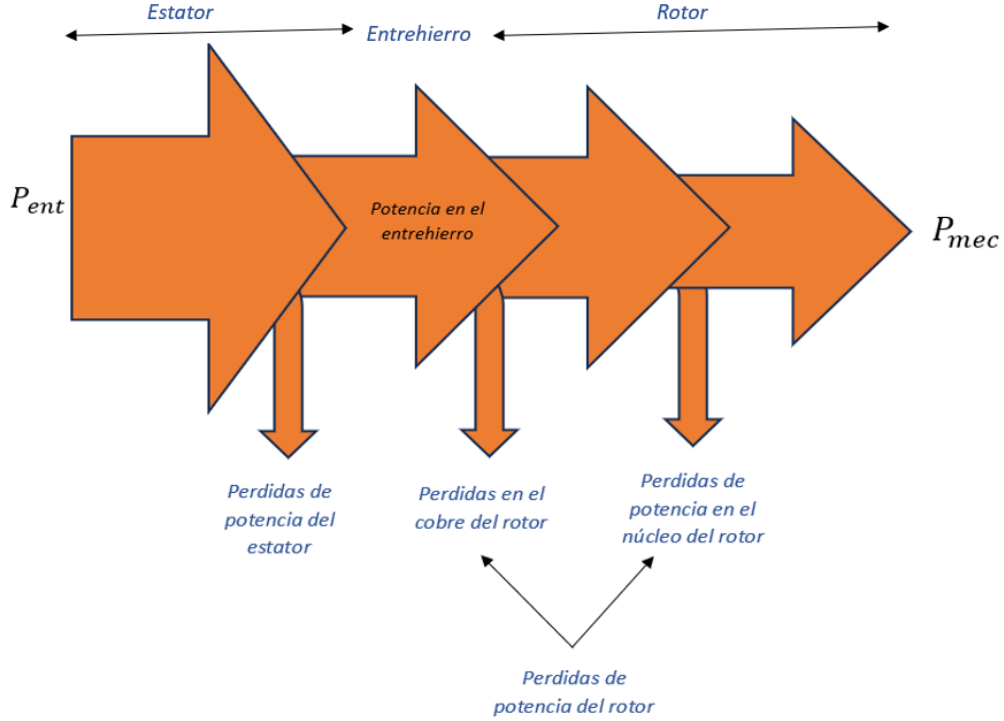


Figura 11: Flujo de potencia y pérdidas de los motores de inducción [5]

La potencia activa de entrada P_{in} se calcula como [20],

$$P_{in} = \mathcal{R}e \left(\vec{v}_s \cdot \vec{i}_s^* \right) = V_{ab} i_a + V_{cb} i_c \quad (61)$$

y la potencia del entrehierro

$$P_{ag} = T_e \omega_s \quad (62)$$

El par eléctrico en el entre hierro (T_e) viene dado por [20]

$$T_e = p \vec{\lambda}_s \times \vec{i}_s = p (\lambda_{s\alpha} i_{s\beta} - \lambda_{s\beta} i_{s\alpha}), \quad (63)$$

donde:

$$\vec{\lambda}_s = \int_0^t (\vec{v}_s - R_s \vec{i}_s) d\tau \quad (64)$$

$$\vec{v}_s = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{1}{1 - \alpha^2} (v_{ab} + \alpha v_{bc} + \alpha^2 v_{ca}) \quad (65)$$

$$\vec{i}_s = \sqrt{\frac{2}{3}} (i_a + \alpha i_b + \alpha^2 i_c); \quad \alpha = e^{j\frac{2\pi}{3}} \quad (66)$$

La velocidad angular (velocidad angular mecánica = ω_m , velocidad angular eléctrica = ω_r) se puede estimar basándose en los armónicos de la corriente del estator que surgen de los efectos de ranurado y excentricidad del rotor. De [29, 26],

$$\omega_m = \frac{2}{p} \omega_r = \frac{2}{p} \omega_s (1 - s) = \frac{2\pi (f_{sh} - f_s n_w)}{kN_R + n_d} \quad (67)$$

El operar un motor a más de 10 °C por encima de la clase de aislamiento nominal del motor puede reducir la vida útil a la mitad. El calor excesivo acelerará la degradación del sistema de aislamiento de un motor. El calentamiento de un motor puede ser causado por una sobrecarga, arranques demasiado frecuentes, temperatura ambiente alta, por nombrar algunos. Por ejemplo, un motor con un sistema de aislamiento clase F tiene una clasificación de 155°C. Si el motor supera esta temperatura más de 10°C, entonces la vida útil del sistema de aislamiento puede reducirse a la mitad [21]. Las pérdidas de potencia (fuentes de calor) generadas en el estator y el rotor se transforman en calor, parte del cual se utiliza para modificar sus temperaturas con sus capacitancias térmicas de almacenamiento de calor.

2.2.4. Proceso de transferencia de calor en análisis térmico de motores de inducción

Para modelar el comportamiento térmico de la máquina de inducción es necesario aplicar las ecuaciones de transferencia de calor. En cualquier lugar donde exista un gradiente de temperatura, se producirá una transferencia de calor desde el punto de menor temperatura a la más caliente. La transferencia puede ocurrir de diferentes formas: por radiación, convección y conducción. Esta sección presenta una introducción general de las transferencias de calor comunes asociadas con el comportamiento térmico de la máquina de inducción.

- CONDUCCIÓN:

La transferencia de energía por conducción puede tener lugar en sólidos, líquidos y gases. Puede considerarse como la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia a las partículas adyacentes que son menos energéticas debido a las interacciones entre los átomos. La tasa temporal de transferencia de energía por conducción se cuantifica mediante la ley de Fourier como [22]:

$$Q_x = -kA \frac{dT}{dx} \quad (68)$$

donde k es la conductividad térmica del material, que describe su capacidad para transportar calor, y $\frac{dT}{dx}$ es el gradiente de temperatura. El signo negativo se debe a que la transferencia de calor se produce en sentido contrario al gradiente de temperatura.

- CONVECCIÓN:

La convección es la transferencia de calor que se produce entre una superficie y un fluido cuando existe un gradiente de temperatura. La convección puede ocurrir como libre o forzada, la convección libre se produce cuando una fuerza externa no mueve el fluido alrededor de una superficie. Por otro lado, la convección forzada se produce cuando se aplica una fuerza externa al fluido, que en el caso de las máquinas totalmente cerradas refrigeradas por ventilador (TEFC) es el ventilador montado en el extremo. La transferencia de calor por convección o la tasa de transferencia de energía del sistema al fluido puede cuantificarse mediante la expresión [22]:

$$Q = kA_f(T_b - T_f) \quad (69)$$

Esto se conoce como Ley de Newton del enfriamiento o ecuación de Newton. En (69), A_f es la superficie, T_b es la temperatura en la superficie y T_f es la temperatura del fluido lejos de la superficie. Para determinar k_f es necesario considerar las características del ventilador, debido a que el principal obstáculo a la hora de modelar la convección es la determinación de la conductividad térmica del fluido k_f [22].

En un elemento de volumen el cambio almacenamiento de energía ΔU en un intervalo de tiempo Δt , se caqlcula mediante la siguiente expresión [23]:

$$\frac{\Delta U}{\Delta t} = m c \frac{\Delta T}{\Delta t} = C_T \frac{\Delta T}{\Delta t}, \quad (70)$$

donde m es la masa del sólido y c el calor específico, que es una propiedad térmica del material. En (70), C_T se define como la capacitancia térmica del material.

$$C_T = m \cdot c \quad (71)$$

Según la ley de Fourier en un sólido, el calor ΔQ transferido por conducción en un intervalo de tiempo Δt viene dado por la siguiente expresión [23]:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = -kA \frac{(T_1 - T_2)}{\Delta l} = \frac{(T_1 - T_2)}{R_{Tcd}} \quad (72)$$

donde A es el área de la sección transversal del volumen del elemento, Δl es la distancia entre los dos extremos, que están a las temperaturas T_1 y T_2 , y k es una constante de proporcionalidad llamada conductividad térmica del material. En (72), R_{Tcd} es la resistencia térmica del material a la transferencia de calor por conducción, expresada como:

$$R_{tcd} = \frac{\Delta l}{kA} \quad (73)$$

2.2.5. Estimación de parámetros del modelo térmico de la MI

Se determina los parámetros del modelo térmico de segundo orden mostrado en la Fig. 10. Los parámetros del modelo térmico de la MI trifásica de rotor bobinado utilizada en este análisis se obtienen mediante diferentes ensayos térmicos de medición de temperatura. A partir de estos datos se realizan los cálculos que permiten obtener los parámetros térmicos: las resistencias y capacitancias térmicas del rotor y estator.

El desarrollo de un modelo térmico para una máquina de inducción es muy importante porque permite predecir y determinar la temperatura del estator y del rotor del motor de inducción en diferentes condiciones de operación.

El modelo térmico de la MI se divide en los elementos fundamentales, caracterizando por nodos, resistencias térmicas, capacitancias térmicas y las fuentes de calor del estator y rotor. Para describir estos elementos es necesario realizar diversas mediciones, introduciendo fuentes de calor mediante pérdidas en la máquina y registrando las temperaturas en diferentes puntos [22].

Hay que establecer la dependencia de los parámetros térmicos de las variables de funcionamiento. La dependencia de las pérdidas en el estator y el rotor con respecto a las corrientes de fase I_e e I_r .

Las pérdidas de potencia en el estator se calculan mediante la expresión:

$$P_{P_{est}} = 3 \cdot I_e^2 \cdot R_e \quad (74)$$

donde:

I_e es la corriente del estator en A

R_e es la resistencia del estator en Ω

Y las pérdidas de potencia en el rotor se obtiene mediante:

$$P_{P_{rot}} = 3 \cdot I_r^2 \cdot R_r \quad (75)$$

donde:

I_r es la corriente del rotor en A

R_r es la resistencia del rotor Ω

▪ Resistencia térmica

La resistencia térmica tiene en cuenta tanto las transferencias de calor por conducción en el estator y en el rotor hacia la carcasa exterior, como por convección natural entre el la superficie externa y el ambiente. Esta resistencia térmica considera la transferencia de calor entre el cobre del devanado y el laminado del estator.

Una de las principales aplicaciones de la teoría de transferencia de calor es la determinación de las resistencias térmicas de los componentes de la MI [22].

La resistencia térmica R_T se obtienen mediante la expresión:

$$R_T = \frac{\Delta T [^{\circ}C]}{P_p [W]} \quad (76)$$

donde:

ΔT es el incremento térmico sea en el estator o rotor

P_p son las perdidas de potencia en el estator o rotor

▪ Capacitancia térmica

Las capacitancias térmicas representan el comportamiento temporal de la temperatura debido a la capacidad de acumulación de calor de los materiales y son fundamentales en el análisis transitorio del comportamiento térmico.

Si el tiempo interviene en las ecuaciones, la capacidad de un material para almacenar o liberar calor se convierte en una cuestión determinante y la capacitancia térmica debe ser considerada [22]. Las capacitancias térmicas pueden estimarse mediante el ajuste de curvas obtenidas al registrar las temperaturas en los diferentes puntos de la MI a través del tiempo. Estos datos se obtienen a partir de mediciones realizadas tanto en CC como en CA.

Para determinar la capacitancia térmica del estator C_{est} o del rotor C_{rot} se utiliza la constante de tiempo de la respuesta de primer orden de un circuito RC :

$$\tau = RC \Rightarrow C = \frac{\tau}{R} \quad (77)$$

donde:

τ es la constante de tiempo en segundos

R es la resistencia térmica

En la Fig. 12, se presenta el modelo térmico de primer orden de la MI. Considerando todo el conjunto como una sola resistencia y capacitancia térmica.

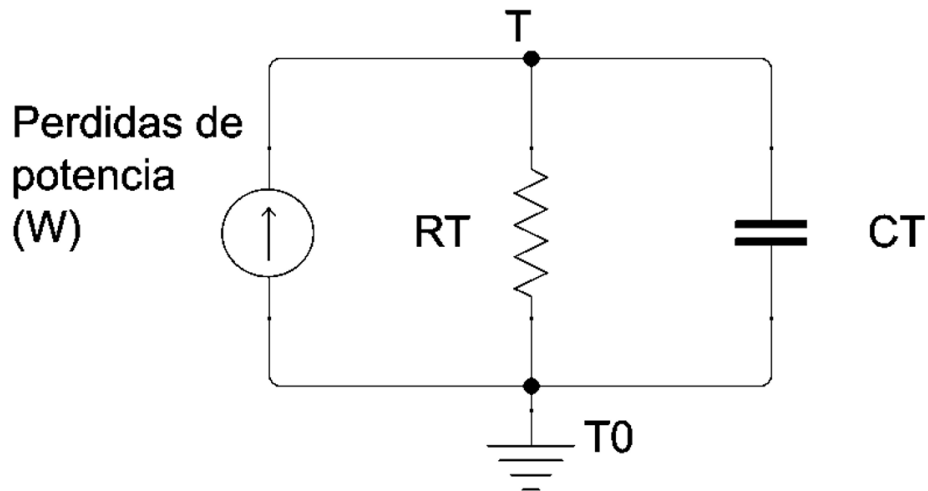


Figura 12: Parámetros térmicos de la MI utilizando un modelo simplificado de primer orden [6]

2.2.6. Ensayos para obtener los parámetros térmicos del modelo de la MI

- **Primer ensayo** en corriente directa con el rotor detenido, incrementando su temperatura del estator.

En este ensayo se aplica corriente directa en las bobinas del estator que permita el calentamiento controlado de la MI. Esta corriente genera pérdidas en el estator y el calor producido incrementa la temperatura tanto en el estator como en el rotor. Esto permite determinar en estas condiciones la resistencia térmica propia del estator y la resistencia térmica mutua entre el estator y rotor con la máquina detenida.

- **Segundo ensayo** inyección de corriente directa en el rotor, manteniendo este detenido.

En este ensayo se aplica una corriente directa en el rotor bobinado, esta corriente genera pérdidas de potencia en el rotor y se registra el incremento de temperatura en el rotor y en el estator.

- **Tercer ensayo** en corriente alterna con el motor girando en vacío.

En este caso el motor está girando a velocidad sincrónica, sin carga en su eje y operando a su tensión nominal. Se realizan las mediciones de temperatura solo en el devanado del estator porque el rotor se encuentra girando y es difícil la colocación de termopares en esta condición.

- **Cuarto ensayo** en corriente alterna con el motor girando con carga conectada a su eje

En este ensayo el motor gira con carga en su eje, obtenida mediante una máquina de CC, aplicando la tensión nominal. Se mide la temperatura del estator tanto con los termopares como mediante termómetros infrarrojos para el rotor.

2.2.7. Técnicas de análisis térmico

Sobre las técnicas para el análisis térmico se encuentran agrupados en tres categorías:

1. Métodos analíticos
2. Métodos numéricos
3. Modelado de componentes experimentales [24]

2.2.8. Métodos analíticos

Los métodos analíticos se fundamentan en asociar el modelo térmico de la máquina a circuitos eléctricos equivalentes con resistencias y capacitancias térmicas. Las fuentes de calor se modelan mediante fuentes de corriente [24].

2.2.9. Métodos numéricos

Los métodos numéricos representan las diferentes partes de la máquina mediante sus ecuaciones diferenciales aplicadas a los materiales utilizados en su construcción. Las soluciones se obtienen aplicando elementos finitos a estas representaciones geométricas del equipo. En este tipo de modelos los tiempos de computación pueden ser significativamente superiores a los obtenidos mediante simulación analítica, pero los resultados son mucho más precisos. Son muy utilizados en la etapa de diseño de las máquinas eléctricas [24].

2.2.10. Modelo de componente experimental

Este modelo utiliza información recopilada durante la operación del convertidor electromecánico en períodos largos de tiempo para detectar posibles fallas o sobrecargas en función de algunas medidas locales de temperatura [24].

2.3. Equipos de medición de temperatura

2.3.1. Termómetros infrarrojos Fluke 62 MAX y 62 MAX+

Los Termómetros infrarrojos Fluke 62 MAX y 62 MAX + pueden determinar la temperatura superficial mediante la medición de la cantidad de energía infrarroja radiada por la superficie de un objeto concreto. Tenga en cuenta que los modelos japoneses indican únicamente grados Celsius (centígrados).

- Advertencia:

Para evitar daños en los ojos o lesiones personales: No mire directamente el rayo láser. No apunte el rayo láser directamente a personas ni animales o indirectamente en superficies reflectantes. No utilice el producto cerca de gases o vapores explosivos, o en ambientes húmedos o mojados.

- Precaución:

Para evitar daños al producto, no deje el termómetro sobre objetos que estén a una alta temperatura o cerca de ellos.

Limpie cuidadosamente el lente de detección infrarroja con un bastoncillo de algodón humedecido con agua.[7].



Figura 13: Termómetro IR infrarrojo Fluke 62 MAX [7]

2.3.2. Medidor de temperatura de cuatro canales con registrador SD

Este medidor determina, muestra y guarda las lecturas de temperatura de hasta cuatro sondas de temperatura termopar tipo J, K, T, E, R o S y dos sondas RTD Pt100 (Pt100Ohm). Muestra lecturas de las temperaturas (T1, T2, T3, T4) o la diferencia (T1-T2) y almacena 99 lecturas manualmente y lecturas de 20 millones a través de la tarjeta SD, registra lecturas con fecha y marca de hora reales, frecuencia de muestreo programable por el usuario: 1 a 3600 segundos. Las lecturas de datos registradas se guardan en una tarjeta SD en formato excel para luego transferida a una PC. Adicionalmente, posee un puerto RS232 que permite la transmisión de datos a la PC [6].



Figura 14: Medidor de temperatura de 4 canales Extech SDL200 [6]

Los termopares o termocuplas, se conectan en las entradas identificadas como T1, T2, T3 y T4 como se observa en la Fig. 15. Es importante seleccionar el tipo de termopar (por ejemplo, J, K, T, E, R o S) que coincida con el tipo de termopar utilizado. En el modo de termopar normal, el medidor mostrará al mismo tiempo la temperatura correspondiente a los termopares T1 a T4. En caso de que un termopar no esté conectado o si la medición está

fuera del rango de la escala, se mostrarán rayas en el medidor [6].



Figura 15: Entradas de los cuatro canales de conexión para los termopares del equipo Extech SDL200 [6]

2.3.3. Multímetro digital con termocupla para medición de temperatura

Un multímetro digital es un dispositivo que se utiliza para medir varias propiedades eléctricas, como voltaje, corriente, resistencia, continuidad, y algunos tienen la propiedad de la medición de la temperatura con la conexión de un cable de termopar tipo K. Para esta medición es preciso insertar un adaptador de termopar y una sonda de temperatura o en casos insertar directamente la termocupla que viene acoplada con los conectores tipo banana para la conexión en el multímetro. Tomar en cuenta que la medición de la temperatura solo puede ejecutarse en los rangos establecidos por el fabricante del equipo, siendo los valores más comunes de medición entre -20 y $+1000$ °C dependiendo de cada equipo. [8].



Figura 16: Multimetro digital completo con capacidad de medición de temperatura [8]

2.3.4. Termopares o termocuplas

Los termopares son sensores formados por dos metales que generan tensión cuando existe una diferencia de temperatura entre los dos conductores metálicos. La cantidad de tensión producida depende de esta diferencia de temperatura. Los termopares funcionan basándose en el efecto Seebeck. Los termopares deben diseñarse de forma robusta para protegerlos de las condiciones de temperatura y tensión más adversas. Pueden producirse cortocircuitos, fallos en la cubierta y daños durante el funcionamiento o la instalación.

Las posibles razones de los fallos son muchas: el diseño de la sonda/vaina, la elección de los materiales de aislamiento y la construcción del termopar (con conexión a tierra, sin conexión a tierra o punta expuesta), instalaciones inadecuadas [9].

Los termopares se dividen en tipos en el estándar. Los tipos E, J, K, N y T son el grupo de termopares de metales no preciosos. El grupo de termopares de metales preciosos incluye los tipos S, R y B. Los diferentes tipos difieren en datos característicos, como materiales y rangos de temperatura [25].

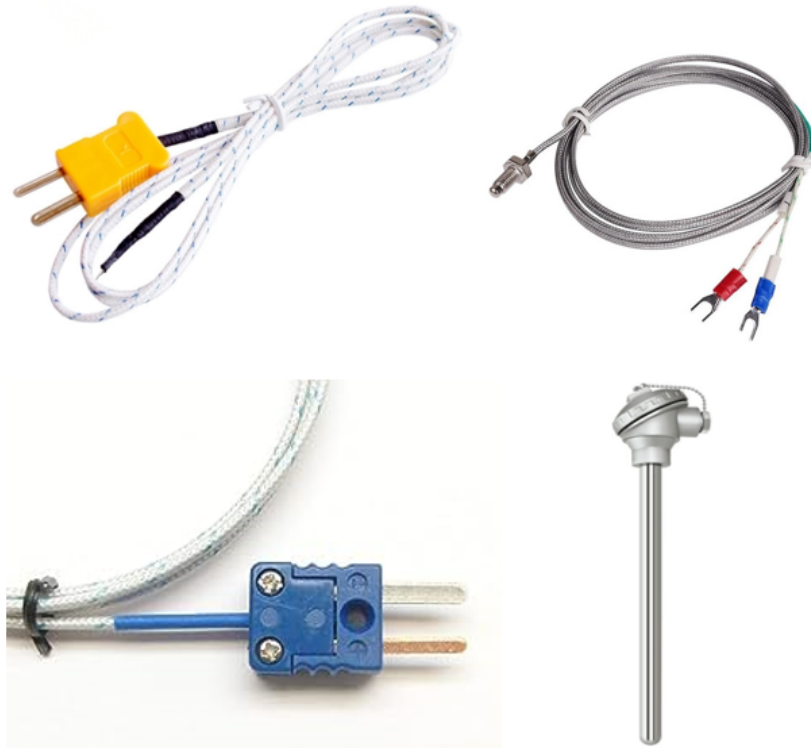


Figura 17: Termopares (Termocuplas) [9]

3. Modelación y pruebas de la MI

A continuación se presentan los cálculos realizados tanto para determinar el modelo eléctrico como en el modelo térmico de la MI.

3.1. Cálculo de parámetros del modelo eléctrico de la MI

En la Fig. 18, se muestra la MI de rotor bobinado utilizada en este estudio:



Figura 18: MI de rotor bobinado utilizada en el estudio

En la Fig. 19 se presenta los datos de placa de la MI utilizada.

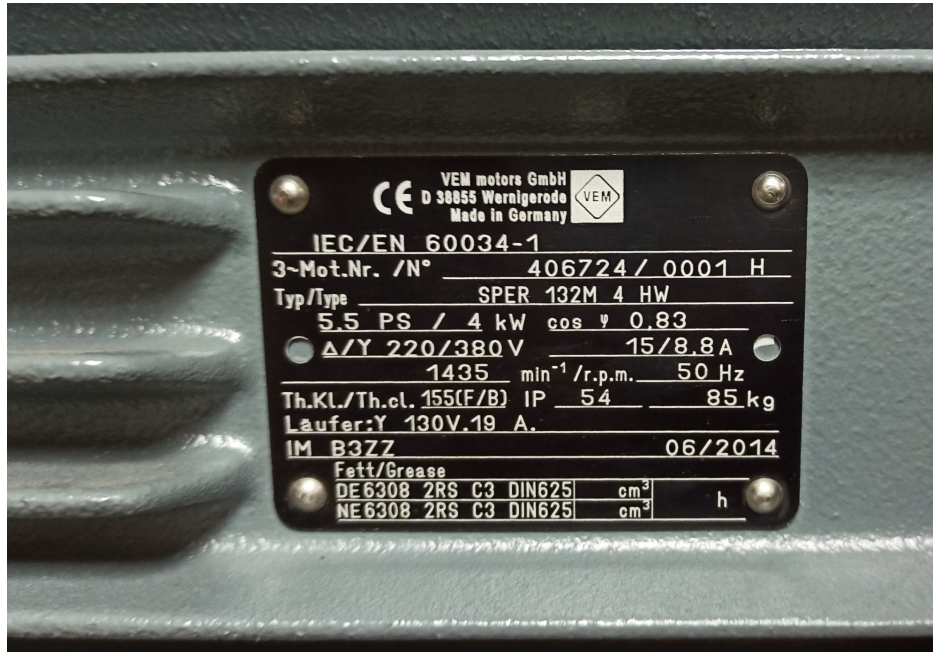


Figura 19: Datos de placa MI de rotor bobinado utilizado en el estudio

Datos de la maquina:

Tabla 2: Datos de placa de la máquina.

Datos de placa MI trifásica de rotor bobinado					
P_n	V	I	$\cos\phi$	f	n
4 kW	220/380 V	15/8.8 A	0.83	50 Hz	1435 rpm

Resultados:

Mediante (24), (25) se determina I_{base} y Z_{base}

Tabla 3: Bases del sistema

S_{base}	I_{base}	Z_{base}	V_{base}
4kW	10.4972 A	12,10 Ω	220 V

Mediante (27), (28), (29), (30), (31), (32), (33), se obtiene los valores iniciales de la siguiente tabla:

Tabla 4: Valores iniciales para obtener los parámetros del modelo eléctrico

Valores						
I_m	V_{th}	P_e	η	No. pares de polos	ω_s	s
0.4763	0.9677	4744	0.8432	2	1500	0.043

Tabla 5: Valores de Vacío

Valores				
P_0	Q_0	X_m	R_m	S_0
0.0354	0.4749	1.9718	26.4532	0.4763

Mediante (39), (40), (41) y (42) se obtienen los valores finales de la tabla 6.

Tabla 6: Valores finales corriente, impedancia y Par

Valores			
I_0	I_{rn}	Z_r	T_n
$0.4920 \angle -85,74$	$1.1895 \angle -14,92$	$0.7861 + j0.2094$	1.0452

La resistencia del rotor en pu se determina con 44 y La resistencia del estator en pu con 45.

Como en el calculo se obtuvo que R_e es negativa se asume que:
 $R_r = R_e = 0.0385$.

Tabla 7: Parámetros obtenidos en los cálculos del modelo eléctrico de la máquina.

Parámetros	Valor (pu)
X_m	1.9718
R_m	26.4532
R_e	0.0385
R_r	0.0385
X_{de}	0.1047
X_{dr}	0.1047

Cuando se requiere obtener los valores de los parámetros Reactancia (X) o Resistencia (R) en ohmios se deben multiplicar los valores obtenidos por el valor de Z_{base} calculado.

$$R \text{ o } X \text{ en } \Omega = R \text{ o } X \text{ en pu} \cdot (Z_{base} \text{ en } \Omega); \quad R \text{ o } X \text{ en pu} = \frac{R \text{ o } X \text{ en } \Omega}{Z_{base} \text{ en } \Omega}$$

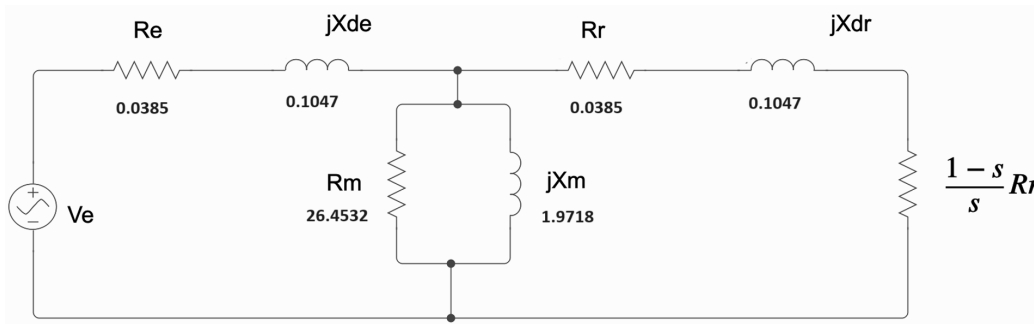


Figura 20: Parámetros del Modelo eléctrico de la máquina de inducción trifásica

Pruebas de vacío y rotor bloqueado:

Prueba de vacío:

Mediante (46) se determina la impedancia de la rama de magnetización.

Mediante (48), (50) y (51) se determina los parámetros de vacío los cuales se observan en la siguiente tabla:

Tabla 8: Parámetros obtenidos en los cálculos de la prueba de vacío a la máquina.

Prueba Vacío		
Parámetros	Valor	Unidad
I_o	5.090	A
V_o	220	V
P_o	173.2	W

Prueba de Rotor Bloqueado:

$$Z_m = 0,1461 + j1,9609 \quad (78)$$

$$Z_r = 0,0385 + j0,1047, \quad Z_e = 0,0385 + j0,1047 \quad (79)$$

$$Z_{Rb} = = 0,2173 \angle 70,23^\circ \quad (80)$$

Mediante (53) se determina la impedancia de rotor bloqueado.

Mediante (54), (56) y (58) se determina los parámetros de rotor bloqueado los cuales se observan en la siguiente tabla:

Tabla 9: Parámetros obtenidos en los cálculos de la prueba de rotor bloqueado a la máquina.

Prueba Rotor Bloqueado		
Parámetros	Valor	Unidad
I_{Rb}	14.98	A
V_{Rb}	68.30	V
P_{Rb}	600	W

Por medio de los cálculos realizados al modelo eléctrico de la máquina de inducción se obtuvieron los parámetros del modelo así como también los resultados de las pruebas de vacío y rotor bloqueado con las cuales se obtendrán las pérdidas de potencia en el estator y rotor de la máquina. Posteriormente se realizaron los ensayos de vacío y rotor bloqueado en el laboratorio y los resultados obtenidos, tanto en ensayos como en los cálculos se han comparado, observando errores menores a XXX %.

Los valores de potencia obtenidos en los ensayos anteriores permiten determinar las pérdidas de potencia que se generan en el estator y rotor, y partiendo de estos resultados se obtienen los parámetros térmicos requeridos para modelar la MI.

En cuanto al modelado y las cuatro pruebas que se realizaron a la máquina, tanto en corriente continua como en alterna, se obtuvieron variables tales como voltajes, corrientes, potencia y temperaturas en el estator y el rotor. Estas mediciones se realizaron hasta que la máquina alcanza su estado estable de temperatura. Mediante un análisis con estas mediciones se obtiene y valida el modelo térmico de la MI utilizada en los ensayos.

En la siguiente tabla se aprecia los valores obtenidos en las dos pruebas iniciales de la MI con la intención de obtener las pérdidas de potencia tanto en el estator como en el rotor.

Tabla 10: Valores obtenidos en laboratorio en la prueba de vacío y rotor bloqueado

Magnitudes	Prueba de vacío	Prueba de rotor bloqueado
Corriente (I)	4.89 A	15 A
Voltaje (V)	207 V	58 V
Potencia (W)	340 W	609 W

3.2. Ensayos térmicos:

- Primera prueba en CC estator

En esta prueba se alimenta el MI con CC desde el estator hacia el rotor. En esta prueba el rotor se mantiene detenido y se registraran las temperatura tanto en el estator, en el rotor y la temperatura ambiente cada segundo, hasta que la máquina alcance un estado térmico estable.

Para la medición de las temperaturas se utilizaron termopares tipo K y un dispositivo de medición por radiación infrarroja. Las mediciones se realizaron en diferentes partes del motor, según la prueba realizada y las posibilidades de acceso a los puntos del motor.

En la Fig. (21), se observa las borneras de conexión de la MI de rotor bobinado tanto para el lado del estator como para el lado del rotor, en el primer ensayo se realizara la conexión solo en el lado del estator para que la temperatura sea transferida del lado del estator hacia el rotor.



Figura 21: Borneras de conexión para el estator y rotor de la MI

3.2.1. Colocación de los termopares en la MI

Las mediciones de temperatura se realizan mediante el equipo de medición de cuatro canales Extech sdl 200 con el uso de los termopares tipo K en el cual se denominó a T_1 la temperatura del estator, T_2 la temperatura del rotor y T_3 la temperatura ambiente.

La Fig. 22 muestra los termopares colocados en la MI tanto en el rotor como en el estator y un tercer termopar expuesto a la temperatura ambiente.

El termopar de el estator se fijó a la carcasa de la maquina de manera que esté lo más cerca posible a al estator. El termopar del rotor se colocó ingresando por la caja de los bornes de conexión, llegando exactamente al rotor y fijandolo con pasta térmica para una mejor sujeción y medición.



Figura 22: Termopares tipo K colocados en la MI de rotor bobinado

A continuación en la Fig. 23 se observa la pantalla configurada del equipo de medición en la primera prueba, observando los 3 termopares tipo K colocados e identificados en la pantalla como T1, T2 y T3 para la medición de temperatura en grados centígrados ($^{\circ}C$). La configuración es similar para los demás ensayos realizados más adelante, solo existe una variación en el número de termopares utilizados.



Figura 23: Pantalla configurada del equipo Extech SDL200 para la medición de el primer ensayo en c.c

Se determinan las curvas de temperatura y los parámetros térmicos con respecto al tiempo, realizando un ensayo con el rotor detenido, alimentando con corriente continua el estator, como se muestra en la Fig. 24. La tensión de la fuente del estator y la corriente inicial en las pruebas son 25V y 8A en CC. Se utiliza CC en este ensayo para que la fuente de las pérdidas de potencia estén solamente en el estator.

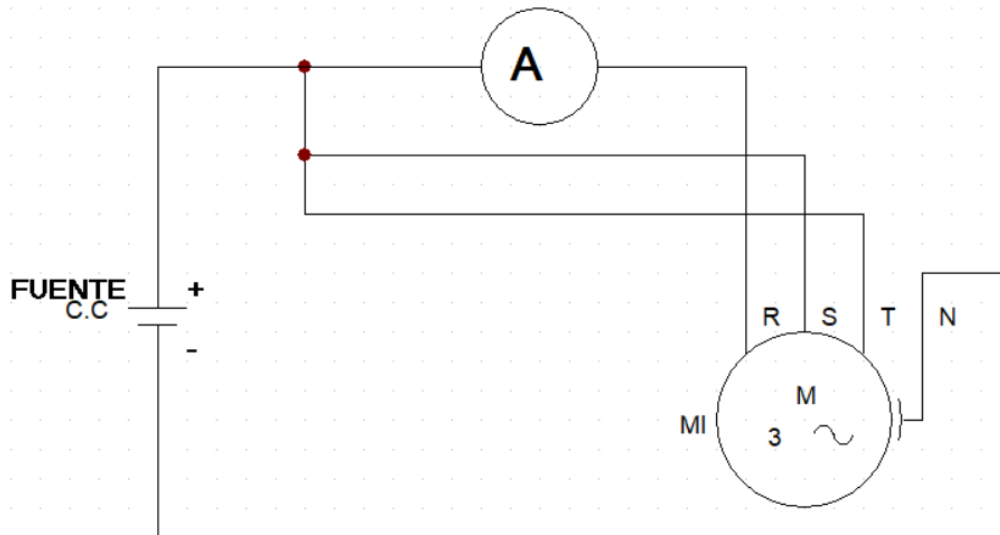


Figura 24: Diagrama de conexión para la prueba en CC con inyección de corriente en el estator

3.2.2. Resultados de temperatura obtenidos mediante el equipo de medición en la prueba CC con inyección de corriente en el estator

En el Anexo B de la Fig. 40 se presenta un extracto de los 31012 datos obtenidos como resultado para esta prueba con registros de temperatura cada segundo. Se demoró 8 horas y 55 minutos, para que el motor alcanzara el estado térmico estable con la corriente inyectada.

Una vez obtenidos los resultados finales de temperatura, cuando la máquina alcanzó su estado térmico estable, tanto en el rotor como el estator, se analizaron los resultados utilizando Matlab para obtener las curvas temperatura-tiempo y se observa el punto exacto en el cual la temperatura empieza a incrementarse en la máquina y el instante en el que la temperatura de la máquina se estabiliza. En segundo lugar, se utiliza una función de costo para ajustar esta curva mediante optimización y así obtener los valores del incremento térmico y las constantes de tiempo necesarias para el cálculo de los parámetros térmicos.

3.2.3. Cálculo de la resistencia y capacitancia térmica del estator

En la Fig. 25 se observan las curvas de los resultados obtenidos para las temperaturas del estator, rotor y ambiente para la prueba DC. Mediante estos resultados se obtienen los valores para el cálculo de los parámetros térmicos en esta prueba.

Utilizando MATLAB se obtienen los incrementos de temperatura (ΔT) y las constantes de tiempo (τ) y se introduce en la expresión (76) y (77) para el calculo de las resistencias y capacitancias térmicas.

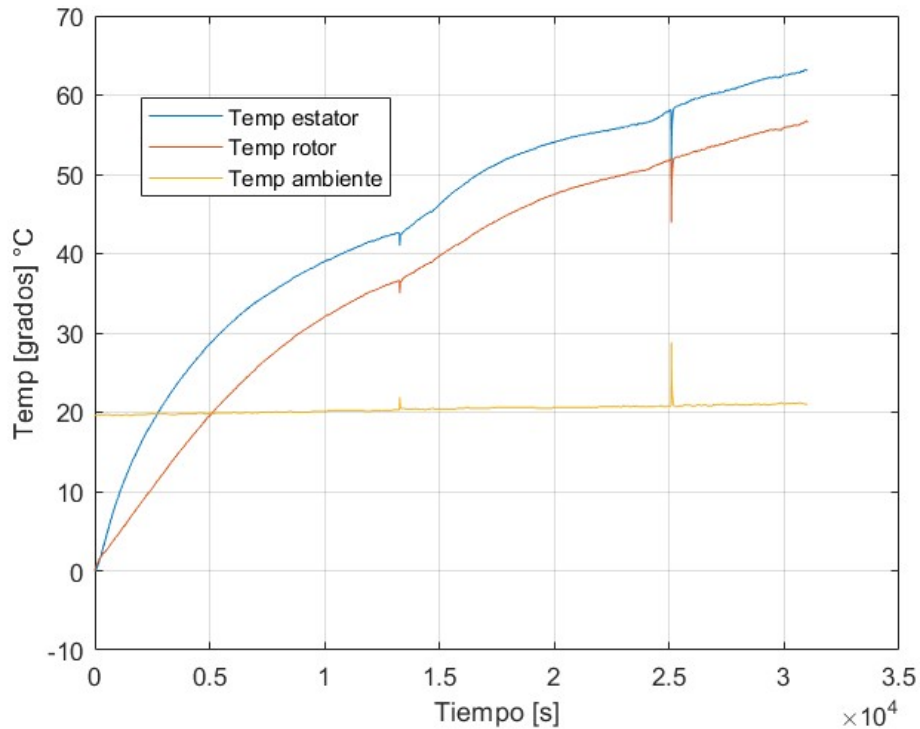


Figura 25: Temperatura estator, rotor y ambiente prueba uno en DC.

En (81) se observa la ecuación con la cual se obtendrá los parámetros del incremento térmico y las constantes de tiempo necesarias para el calculo de los demás parámetros térmicos del modelo de segundo orden.

$$\Delta T(t) = K(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (81)$$

donde $\Delta T(t)$ es el incremento térmico, K en una constante, τ contantes de tiempo y t es el tiempo en segundos.

$$K = T_F - T_A \quad (82)$$

Ecuación de costo para la optimización: Ecuación a ser utilizada en rutinas de optimización de MATLAB para obtener los valores de incrementos térmicos y contantes de tiempo en cada ensayo.

$$\varphi = \sum_i^n (K_1(1 - e^{-\frac{t_i}{\tau_1}}) - f_{mi}(t))^2 \quad (83)$$

donde $f_{mi}(t)$ son los registros de temperatura obtenidos durante el ensayo.

A continuación se presenta el código implementado en Matlab utilizando la ecuación de costo para la optimización y determinación de los parámetros.

```

clc
clear all
global t T1 T2
A=load("Grafico1 Estator.csv");
t=A(250:31010,1);
T1=A(250:31010,2)-A(250:31010,4);
T2=A(250:31010,3)-A(250:31010,4);
figure(1)
plot(t,T1,t,T2)
grid
xlabel('Tiempo [s]')
ylabel('Temp C')
X0=[50,8000];
LB=[0,0];
UB=[100,20000];
X = fmincon(@costo,X0,[],[],[],[],LB,UB)

function F=costo(X)
global t T1 T2
for k=1:length(t)
U(k)=X(1)*(1-exp(-t(k)/X(2)))-T1(k);
end

```

```
F=U*U' ;
end
```

En la tabla 11 se presentan los valores del incremento térmico y constantes de tiempo obtenidas mediante la función de optimización.

Tabla 11: Valores obtenidos del incremento térmico y constante de tiempo en la prueba uno en DC

Parámetro	Símbolo	Estator	Rotor
Incremento térmico	ΔT	62.7 °C	57 °C
Constante de tiempo	τ	9787.4 s	12309 s

$\Delta T_e \rightarrow$ *obtenido mediante matlab*

$\tau \rightarrow$ *obtenido mediante matlab*

La resistencia del estator (R_e) se la determino directamente de la máquina midiéndola en los bornes de cada bobina con el uso de un ohmetro.

La corriente aplicada al estator sera de 8A.

$$R_e = 1,5667 \cdot 3 = 4,68\Omega, I_e = 8A$$

La potencia del estator se obtiene con la ecuación 74.

$$P_e = 3 \cdot I_e^2 \cdot R_e$$

$$P_e = 3 \cdot 8^2 \cdot 4,68 = 898,56 W$$

Mediante (76) se determina la resistencia térmica del estator.

La resistencia térmica del estator se obtiene:

$$R_{T_e} = \frac{\Delta T_e}{P_{pe}} = \frac{62,7^\circ C}{898,56} = 0,0698 = R_{T_e}$$

donde:

ΔT_e es el incremento térmico en el estator

P_{pe} son las perdidas de potencia en el estator

$$\tau = 9787,4 \text{ s}$$

Mediante (77) se determina la capacitancia térmica tanto en el estator como en el rotor.

$$\tau = R \cdot C$$

Capacitancia térmica del estator

$$C = \frac{\tau}{R_T}$$

donde:

τ es la constante de tiempo en segundos

R_T es la resistencia térmica

Los resultados de capacitancias y resistencias térmicas para la validación de modelo térmico de segundo orden se observan mas adelante en la parte final de la segunda prueba.

3.3. Segunda prueba

- Segunda prueba en CC rotor

En esta segunda prueba se alimenta el motor de inducción con CC en el rotor, aplicando una corriente de 19 A. El rotor se mantiene detenido y se registraran mediciones de temperaturas en el estator, el rotor y el ambiente cada segundo hasta que la máquina alcance un estado térmico estable.

Las mediciones de temperatura se realizan mediante el equipo de medición de cuatro canales Extech SD1 200 en el cual se denomina a $T1$ la temperatura del estator, $T2$ la temperatura del rotor y $T3$ la temperatura ambiente.

3.3.1. Resultados de temperatura obtenidos mediante el equipo de medición en la prueba dos

Se muestran los resultados finales obtenidos de medición de temperatura en la prueba dos en el Anexo D y en la Fig. 42 se observan diferencias en los resultados en comparación con la primera prueba ya que en este caso la estabilización de la máquina fue más rápido debido a que la corriente y potencia aplicada tiene un valor más alto.

3.3.2. Cálculo de la resistencia térmica del rotor y la capacitancia térmica del rotor.

En la Fig. 26 se observan las curvas de los resultados de la temperatura del estator, rotor y la temperatura ambiente para esta segunda prueba en CC. Para este caso la curva de temperatura del rotor tiene un valor más alto respecto a la del estator debido a la corriente es aplicada en el rotor. Mediante estas gráficas de temperatura se puede obtener los valores para el cálculo de los parámetros térmicos en esta prueba.

Mediante MATLAB se obtiene los incrementos de temperatura (ΔT) y las constantes de tiempo (τ). Con estos resultados se obtienen las resistencias y capacitancias térmicas utilizando (76) y (77).

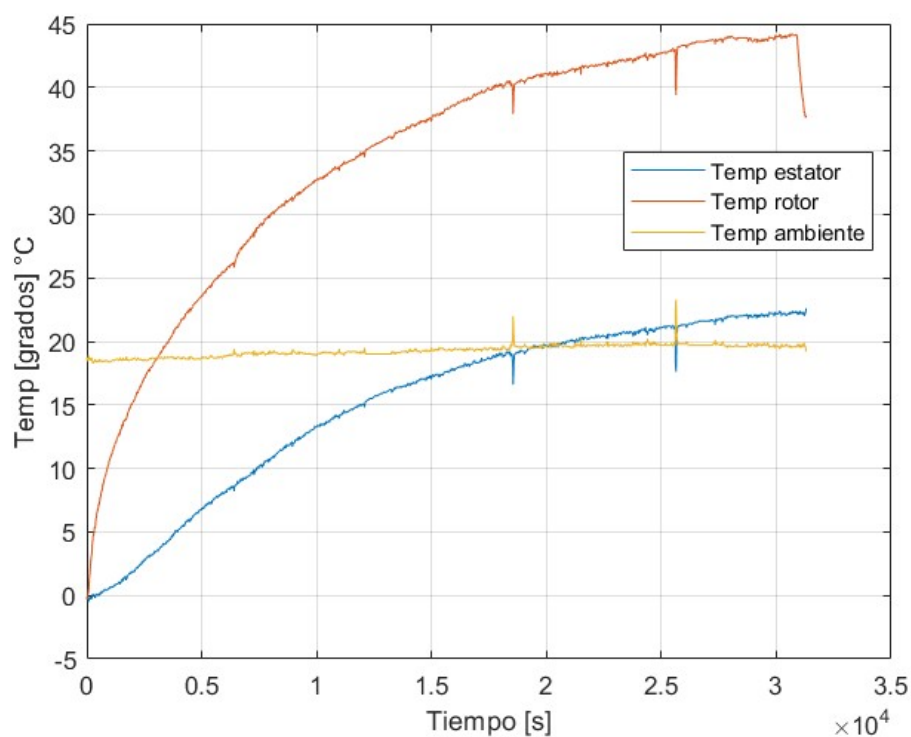


Figura 26: Temperatura estator, rotor y ambiente para la prueba dos en DC

En (83) se observa la ecuación con la cual se obtendrá los parámetros del incremento térmico y las constantes de tiempo necesarias para el cálculo de

los demás parámetros térmicos del modelo de segundo orden.

La Ecuación de optimización a ser utilizada en Matlab es la misma de la anterior prueba para este caso solo se debe colocar las variables obtenidas para calcular los valores de incrementos térmicos y constantes de tiempo en el segundo ensayo.

Tabla 12: Valores obtenidos del incremento térmico y constante de tiempo en la prueba 2 en CC

Parámetro	Símbolo	Estator	Rotor
Incremento térmico	ΔT	26 (°C)	43.1 (°C)
Constante de tiempo (Tau)	τ	14553 seg	6525.8 seg

$\Delta T_e \rightarrow$ obtenido mediante matlab

$\tau \rightarrow$ obtenido mediante matlab

La resistencia del rotor R_r se la determino directamente de la máquina midiéndola en los bornes de cada bobina con el uso de un ohmetro. La corriente aplicada al rotor fue de 19A

$$R_r = 1,6 \Omega, I_r = 19A$$

La perdidas de potencia del rotor se obtiene con 75 en este caso se colocaron los datos del lado del rotor:

$$P_r = 3 \cdot I_r^2 \cdot R_r$$

$$R_r = \frac{1,6}{2} = 0,8$$

$$P_r = 3 \cdot 19^2 \cdot 0,8 = 866,4 W$$

La resistencia térmica del rotor se obtiene con:

$$R_{Tr} = \frac{\Delta T_e}{P_{dce}} = \frac{43,1^\circ C}{866,4 W} = 0,0497 = R_{Tr}$$

$$\tau = 6525,8 s$$

Capacitancia térmica

$$C = \frac{\tau}{R} \rightarrow \left[\frac{W \cdot S}{^{\circ}C} \right]$$

3.3.3. Determinación de parámetros de resistencias y capacitancias térmicas mediante los ensayos uno y dos para validación del modelo térmico

- **Calculo de las resistencias y capacitancias térmicas .**

Estos cálculos permiten obtener los parámetros térmicos para la validación del modelo térmico de la MI.

Calculo de resistencias térmicas:

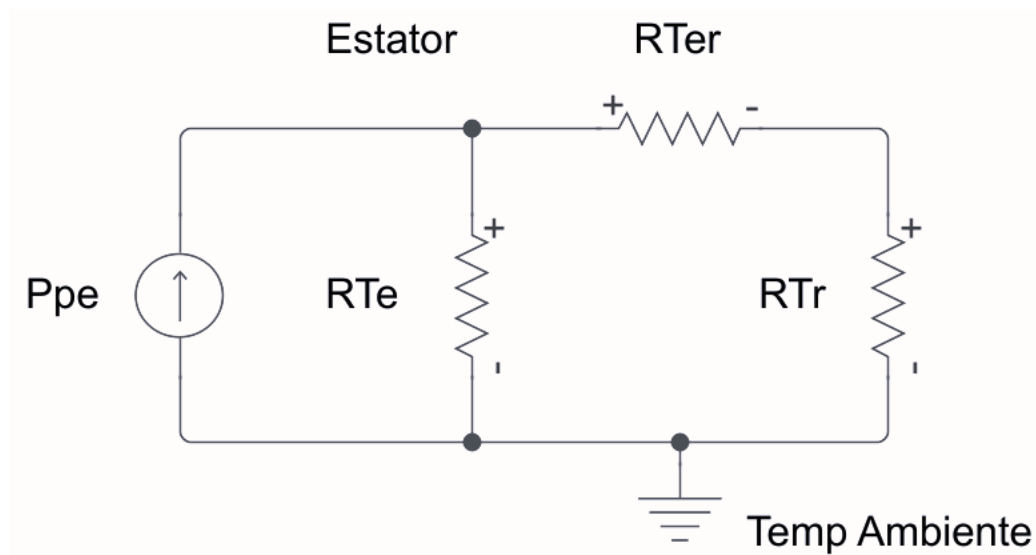


Figura 27: Circuito térmico simplificado para el estator

El modelo 27 representa el circuito térmico simplificado sin considerar las capacitancias para la obtención de las ecuaciones necesarias para el calculo las resistencias térmicas.

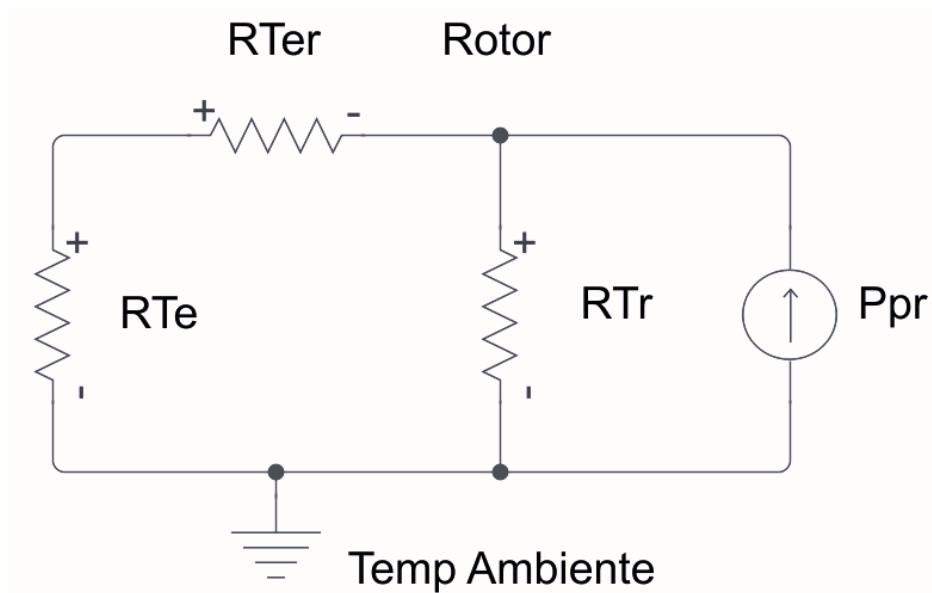


Figura 28: Circuito térmico simplificado para el rotor

La Fig. 28 representa el circuito térmico simplificado para la obtención de las ecuaciones necesarias para determinar las resistencias térmicas analizando desde el lado del rotor.

Denominación:

$$R_1 = \text{Resistencia termica estator} \longrightarrow R_{Te}$$

$$R_2 = \text{Resistencia termica estator - rotor} \longrightarrow R_{Ter}$$

$$R_3 = \text{Resistencia termica rotor} \longrightarrow R_{Tr}$$

Valores de incremento térmico (ΔT) para cada ensayo.

ΔT Primera prueba

$$\Delta T_e = 62,7, \Delta T_r = 57$$

ΔT Segunda prueba

$$\Delta T_e = 43,1, \quad \Delta T_r = 26$$

$$62,7 - 57 = 5,7,$$

Resolución mediante los circuitos de resistencias.

$$\frac{R_3}{R_2} = \frac{5,7}{57} = 0,10; \quad R_3 = 0,10 \cdot R_2$$

$$\frac{R_1 * (R_2 + R_3)}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{\Delta T_e}{P_e}; \quad \frac{R_1 * (R_2 + 0,10R_2)}{R_1 + R_2 + 0,10R_2} = \frac{\Delta T_e}{P_e}$$

$$\frac{1,10R_1R_2}{R_1 + 1,10R_2} = \frac{62,7}{898,56}$$

$$\frac{R_2}{R_3} = \frac{57}{5,7} = 10$$

$$\frac{R_1}{R_3} = \frac{26}{17,1} = 1,5205$$

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{10}{1,5205} = 6,5768$$

$$R_2 = 6,5768 \cdot R_1$$

Se utilizó el siguiente paralelo de resistencias,

$$RT_e \parallel RT_{er} + RT_r$$

$$\frac{RT_e \cdot (RT_{er} + RT_r)}{RT_e + RT_{er} + RT_r} = \frac{\Delta T_e}{P_e}$$

$$\frac{1,10 \cdot R_1 \cdot (6,5768R_1)}{R_1 + 1,10 \cdot 6,5768} = 0,0698$$

$$7,2345R_1^2 = 8,2345 \cdot R_1 \cdot 0,0698$$

$$7,2345 \cdot R_1 = 0,5748$$

Resistencia térmica estator,

$$R_1 = \frac{0,5748}{7,2345} = 0,0794 \longrightarrow R_{Te}$$

Resistencia térmica mutua estator rotor.

$$R_2 = 6,5768R_1 = 6,5768 \cdot 0,0794 \longrightarrow R_{Ter}$$

$$R_2 = 0,5225$$

Resistencia térmica rotor.

$$R_3 = \frac{R_2}{10} = \frac{0,5225}{10} = 0,0523 \longrightarrow R_{Tr}$$

Calculo de capacitancias térmicas:

Mediante (77) se determina la capacitancia térmica tanto en el estator como en el rotor.

Capacitancia térmica estator.

$$C_{Te} = \frac{\tau}{R} = \frac{9787,4}{0,0794} = 123267,0025 \left[\frac{W \cdot S}{^\circ C} \right]$$

Capacitancia térmica rotor.

$$C_{Tr} = \frac{\tau}{R} = \frac{6525,8}{0,0523} = 124776,2906 \left[\frac{W \cdot S}{^\circ C} \right]$$

3.4. Tercera prueba

- Prueba CA en vacío

Esta tercera prueba se ha realizado en corriente alterna en vacío con el motor girando a velocidad sincrónica. En este caso se tiene operando el ventilador de refrigeración del mismo de esta manera permitiendo una estabilización térmica más rápida del motor.

Las mediciones de temperatura se han realizado con la utilización de los termopares tipo K y el sensor infrarrojo ha sido unido en la superficie del

estator con uso de la pasta térmica que permite una mejor fijación. En el rotor no es posible colocar el termopar debido a que el motor esta girando a su velocidad sincrónica y no permite fijar el termopar. Los datos de temperatura en el rotor son medidos mediante el sensor infrarrojo FLUKE.

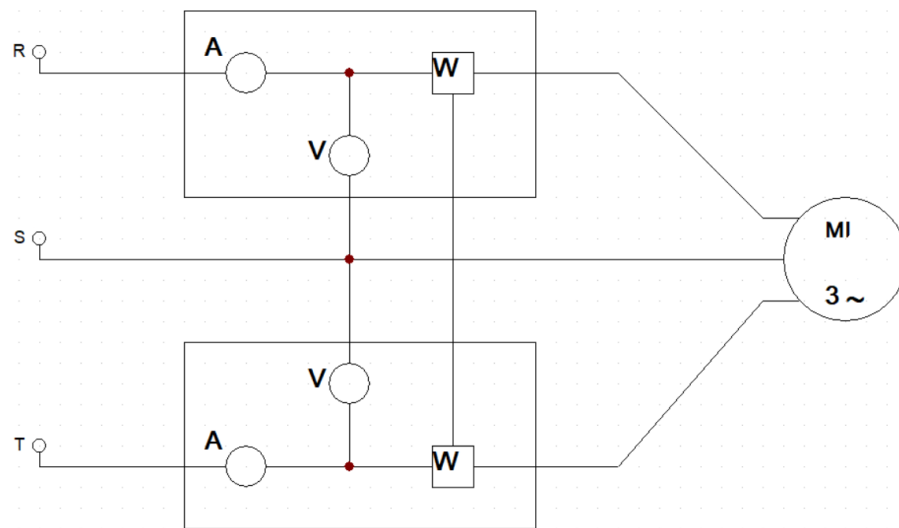


Figura 29: Diagrama de conexión para la prueba 3 en AC

3.4.1. Resultados de temperatura obtenidos mediante el equipo de medición en la prueba tres

En el anexo F de la Fig. 30 se muestran los resultados finales obtenidos en la medición de temperatura de la prueba tres en vacío, obteniendo un total de 6523 mediciones hasta cuando la temperatura de la máquina alcanza su estado estable.

Como se puede observar de los datos finales obtenidos en la prueba tres, la máquina alcanza su estado térmico estable en un tiempo más rápido respecto a las anteriores pruebas en CC debido a que el motor se encuentra girando y el ventilador refrigera y altera la impedancia térmica de la máquina.

3.4.2. Cálculo de la resistencia térmica del estator y la capacitancia térmica en la prueba tres

En la Fig. 30 se observan las curvas de los resultados de la temperatura del estator y la temperatura ambiente para esta prueba de vacío en AC y mediante estos resultados se obtiene los valores para el cálculo de los parámetros térmicos en esta prueba.

A partir de las gráficas obtenidas de temperatura cuando la máquina alcanza su estado estacionario térmico se obtiene los incrementos de temperatura (ΔT) y las constantes de tiempo (τ) y se introduce en la formula para el cálculo de las resistencias y capacitancias térmicas.

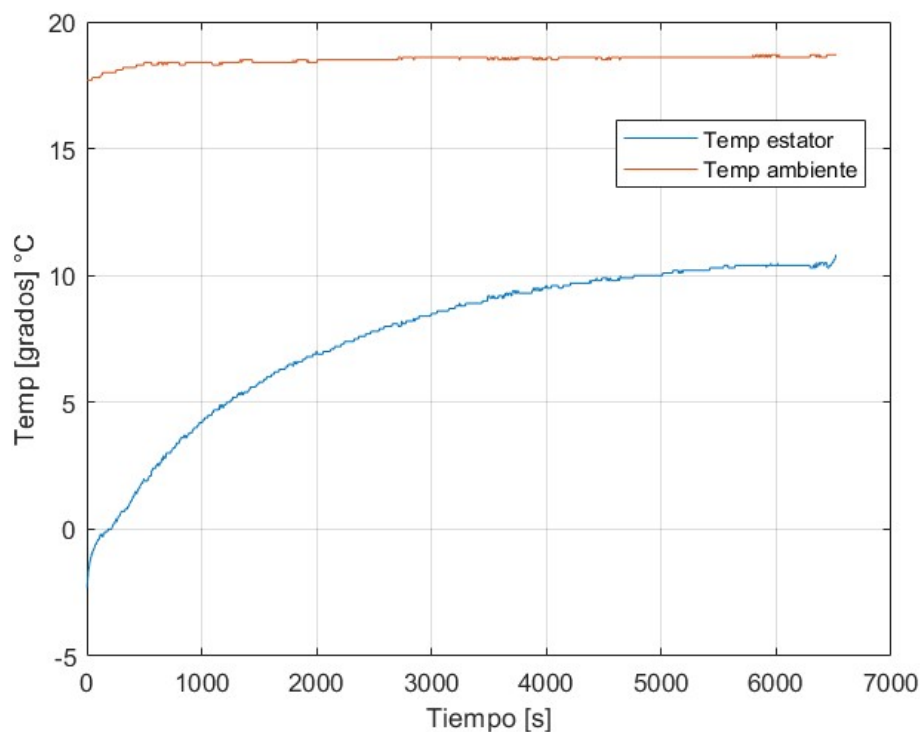


Figura 30: Temperatura en el estator y temperatura ambiente prueba tres en AC.

Utilizando la ecuación de costo (83) en la optimización realizada en Matlab, se obtiene los parámetros del incremento térmico y las constantes de tiempo

para determinar los parámetros térmicos del modelo en la prueba tres.

Tabla 13: Valores obtenidos del incremento térmico y constante de tiempo en la prueba tres en CA

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Incremento térmico	ΔT	11.1	grados centígrados °C
Constante de tiempo	τ	2094.7	segundos (s)

Potencia en vacío.

Se la calcula con la diferencia de las potencias obtenidas en cada vatímetro.

$$P_o = 690 - 302 = 388 \text{ W}$$

Mediante (76) se determina la resistencia térmica del estator.

$$R_{Te} = \frac{\Delta T_e}{P_o} = \frac{11,1^\circ\text{C}}{388 \text{ W}} = 0,02877$$

$\Delta T_e \rightarrow$ obtenido mediante matlab

$\tau \rightarrow$ obtenido mediante matlab

$$\tau = 2094,7 \text{ s}$$

$$\tau = RC$$

Capacitancia térmica

$$C = \frac{\tau}{R} = \frac{2094,7}{0,0287} = 72986,06 \left[\frac{\text{W} \cdot \text{s}}{^\circ\text{C}} \right]$$

3.5. Cuarta Prueba

- Prueba en CA motor cargado

Esta cuarta prueba en CA en la cual el motor se encuentra conectado a una carga y esta gira conectada a su eje, donde se utilizó como carga un motor derivación de CC, por lo que debido al giro del motor con carga entra

en funcionamiento el ventilador del mismo y de manera similar a la anterior prueba la estabilización térmica del motor llega a ser más rápida debido a la rotación del motor. De igual manera, como en la anterior prueba en vacío, las mediciones de temperatura se las ha realizado con el uso de los termopares tipo K y el sensor infrarrojo los datos de temperatura en el rotor son tomados mediante el sensor infrarrojo FLUkE.

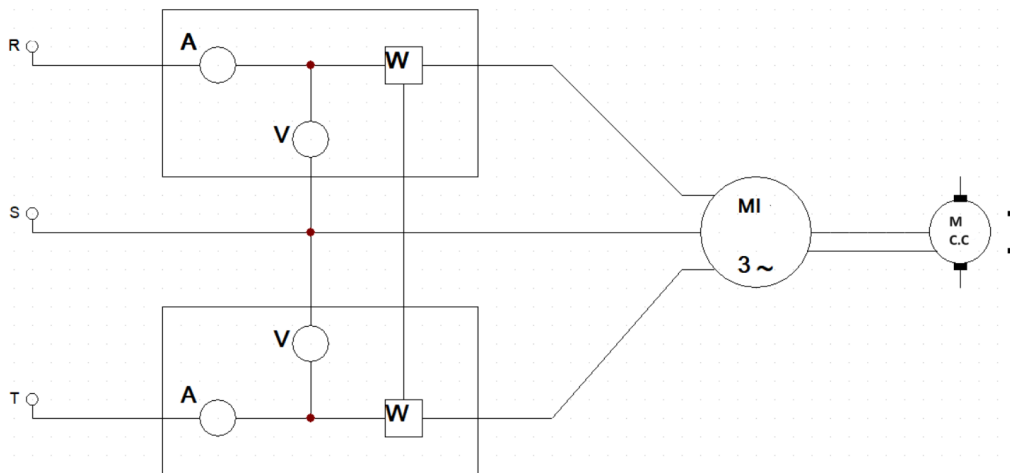


Figura 31: Diagrama de conexión para la prueba cuatro en AC

3.5.1. Resultados de temperatura obtenidos mediante el equipo de medición en la prueba cuatro

En el anexo H de la Fig. 46 se muestran los resultados finales obtenidos de medición de temperatura en la prueba cuatro con el motor de inducción trifásico sometido a carga, obteniendo un total de 9.186 mediciones hasta que la temperatura de la máquina llegó a su estado transitorio.

De forma similar a la tercera prueba se observa en la Fig. 46 los datos obtenidos con el motor conectado a carga, observando un menor número de mediciones hasta que la máquina alcanza su estado térmico estable en un tiempo más rápido comparado a la primera y segunda prueba debido a la operación del ventilador y giro del rotor con la máquina de CC conectada a su eje. Al estar sometido a carga, disminuye en cierta cantidad su velocidad nominal. Esta prueba tarda más tiempo en llegar a estabilizarse la temperatura en comparación a la prueba tres en vacío.

3.5.2. Cálculo de la resistencia térmica del estator y la capacitancia térmica en la prueba 4.

En la Fig. 32 se observan las curvas de los resultados de la temperatura del estator y la temperatura ambiente para esta prueba en CA con el motor conectado a una carga un motor derivación de CC y mediante estos resultados se consigue determinar los parámetros térmicos en esta prueba. A partir de las curvas de temperatura cuando la maquina alcanzo su estado térmico estable se obtienen los incrementos de temperatura (ΔT) y las constantes de tiempo (τ) necesarios para determinar las resistencias y capacitancias térmicas.

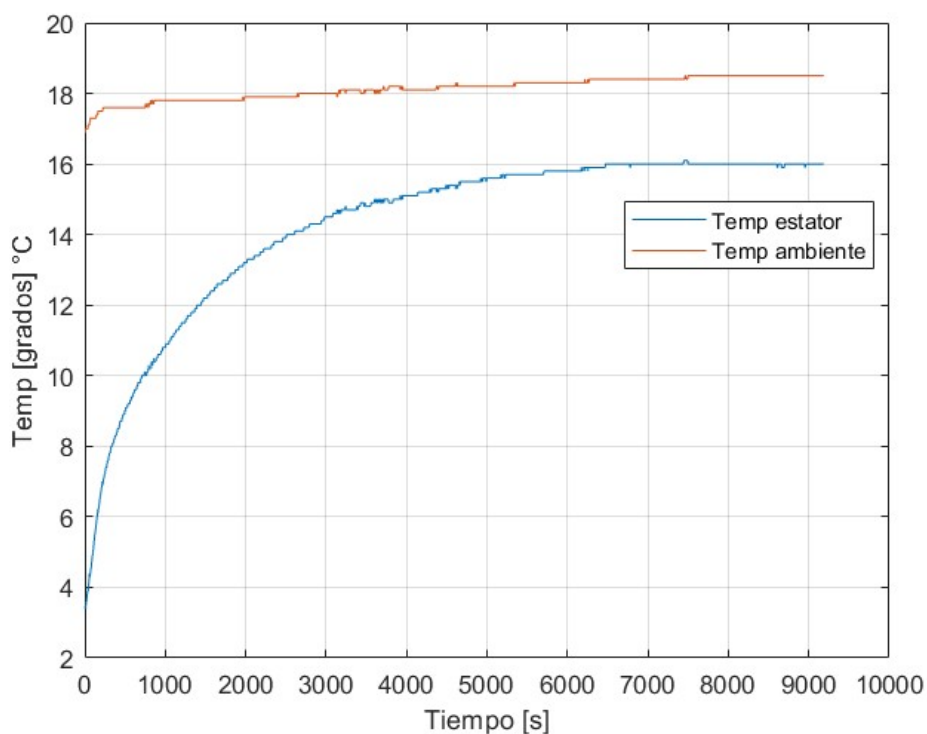


Figura 32: Temperatura en el estator y ambiente en la prueba cuatro en AC.

De la misma manera que en la tercera prueba se utilizo (83) en Matlab en conjunto con las curvas de temperatura para la optimización y la obtención de los parámetros del incremento térmico y las contantes de tiempo necesarias para determinar los demás parámetros térmicos del modelo térmico con la

cuarta prueba.

Tabla 14: Valores obtenidos del incremento térmico y constante de tiempo en la prueba 4 en AC

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Incremento térmico	ΔT	15.15	grados centígrados °C
Constante de tiempo	τ	728.43	segundos (s)

Potencia en el motor de inducción:

Se la calcula con la suma de las potencias obtenidas en cada vatímetro.

$$P_{motor\ ind} = 1975 + 780 = 2755\ W$$

Potencia en la carga motor derivación CC:

$$P_{carga,DC} = 211V * 9,2A = 1941,2W \quad (84)$$

Pérdidas totales de potencia en las dos máquinas:

Se obtiene con la resta de la potencia en el motor de inducción menos la potencia en la carga.

$$P = 2755\ W - 1941,5\ W = 813,8\ W \quad (85)$$

La resistencia térmica del estator se obtiene con:

$$R_{Te} = \frac{\Delta T_e}{P} = \frac{15,15^\circ C}{813,8\ W} = 0,01861$$

$\Delta T_e \rightarrow$ obtenido mediante matlab

$\tau \rightarrow$ obtenido mediante matlab

$$\tau = 728,43\ s$$

$$\tau = R \cdot C$$

Capacitancia térmica

$$C = \frac{\tau}{R} = \frac{728,43}{0,01861}$$

$$C = 39141,85 \left[\frac{W \cdot S}{^{\circ}C} \right]$$

Análisis:

En la primera prueba existen pérdidas de potencia solo del lado del estator porque se encuentra alimentado con cc solo en el estator, en el segundo ensayo es de manera similar las pérdidas de potencia están solo del lado del rotor debido a la inyección de cc solo en el rotor y la máquina va incrementando su temperatura desde el punto en el que se realizó la conexión hacia los otros puntos de la MI.

Los resultados obtenidos inicialmente en las dos pruebas en corriente continua son valores altos en temperatura y tiempo de estabilización térmica, por lo cual sus parámetros térmicos como las resistencias y capacitancias térmicas tienen también valores altos.

En cambio al observar los resultados obtenidos en las siguientes dos pruebas en CA se observa como la máquina alcanza el estado térmico transitorio en un notable menor tiempo, debido a que al estar girando el eje del motor en vacío o con carga permite su estabilización térmica más rápida.

Las resistencias y capacitancias térmicas también disminuyen sus valores para los ensayos en corriente alterna debido al giro del rotor y uso del ventilador del motor.

4. Simulaciones con el modelo térmico de la máquina de inducción trifásica

4.1. Simulación del modelo en ATP

4.1.1. Simulación modelo térmico con el primer y segundo ensayo

El modelo se obtiene analizando las pérdidas de potencia y la transmisión de calor en el interior del motor considerándolo en las partes: estator, rotor y con el ambiente.

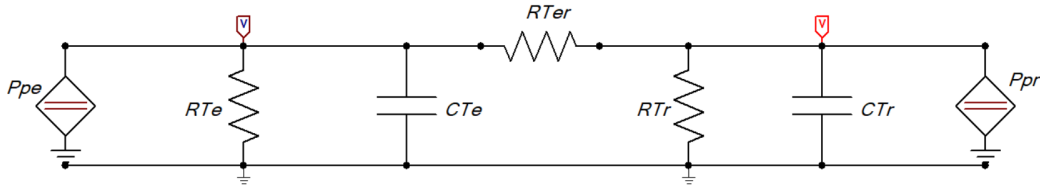


Figura 33: Modelo térmico de 2do orden de la MI en ATP Draw

En la Fig. 33 se observa el circuito del modelo térmico de segundo orden de la máquina de inducción el cual consta de las pérdidas de potencia en el estator (P_{pe}) y rotor (P_{pr}), representado por fuentes de corriente de CC. Contiene también las resistencias térmicas del estator (R_{Te}), rotor (R_{Tr}) y la resistencia térmica mutua estator rotor (R_{Ter}) y finalmente las capacitancias térmicas de el estator (C_{Te}) y rotor (C_{Tr}).

Se han colocado dos voltímetros, uno para el lado del estator y el otro para el lado del rotor, los cuales realizan las mediciones de voltaje para cada lado y estas mediciones representan las temperaturas obtenidas.

Tabla 15: Parámetros térmicos ingresados en ATP Draw

Parámetros Térmicos		
Parámetro	Valor	Unidad
P_{pe}	898.56	W
P_{pr}	866.4	W
R_{Te}	0.0794	$\frac{^{\circ}C}{W}$
R_{Tr}	0.0523	
R_{Ter}	0.5225	
C_{Te}	123267.00	$\frac{W \cdot s}{^{\circ}C}$
C_{Tr}	124776.29	

4.1.2. Simulación temperatura estator rotor

Por medio de los parámetros térmicos calculados con los resultados de las dos primeras pruebas se han obtenido tanto el modelo térmico como curvas de temperatura.

Los parámetros térmicos calculados se ingresaron en el modelo de la Fig. 33 y se obtienen las curvas de temperatura tanto para el estator como para el rotor, cuando alcanzan su estado térmico estable, observando también que

existe una gran similitud de las curvas obtenidas en la parte de los ensayos en laboratorio con la parte de la simulación.

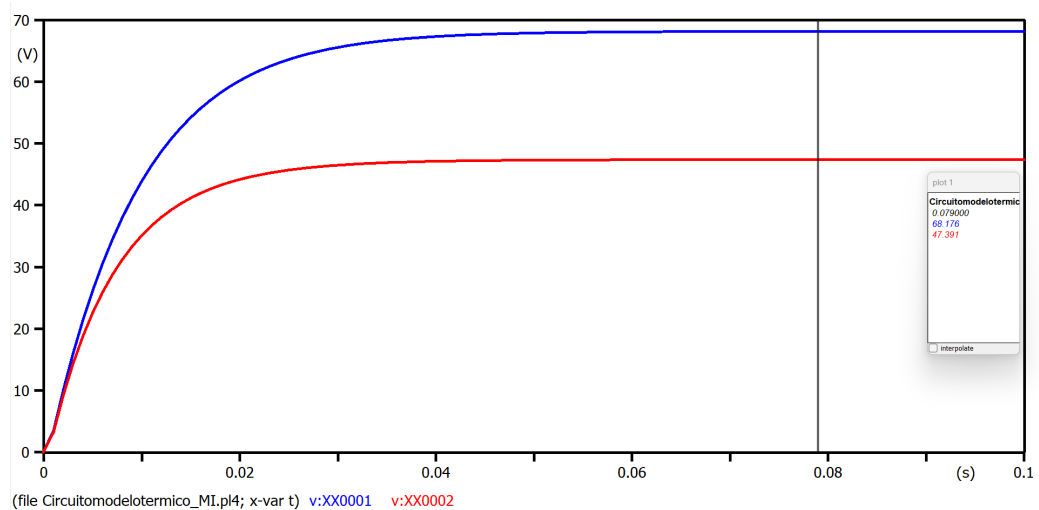


Figura 34: Curvas de Temperatura en el estator y en el rotor

4.1.3. Curva lado de el estator

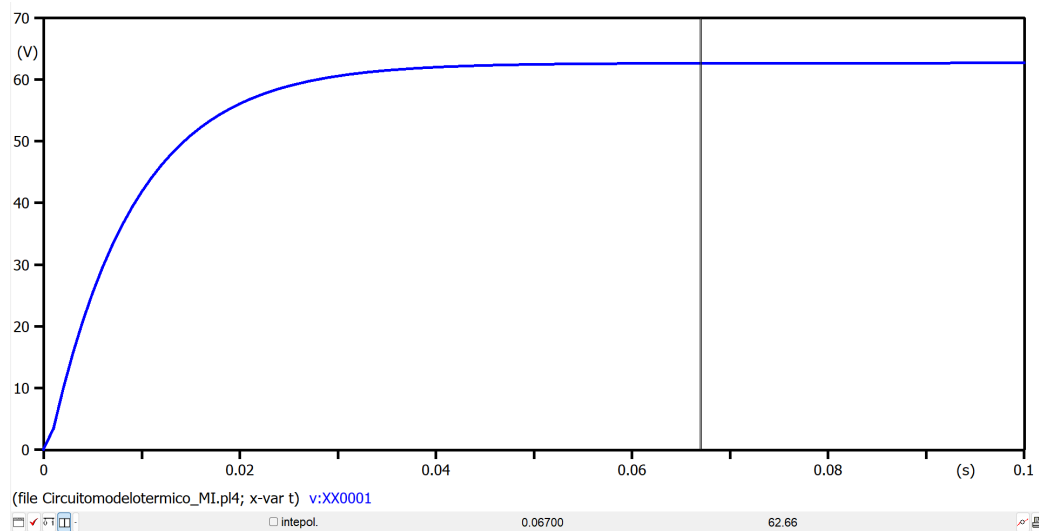


Figura 35: Curva temperatura en el estator simulación primer ensayo.

En la Fig. 35 se observa la curva para el estator cuando la máquina alcanza su estado estable de temperatura en exactamente 62.06 °C esto al colocar 0 pérdidas de potencia del lado del rotor tal como se lo realizó en el ensayo en laboratorio.

4.1.4. Curva lado de el rotor

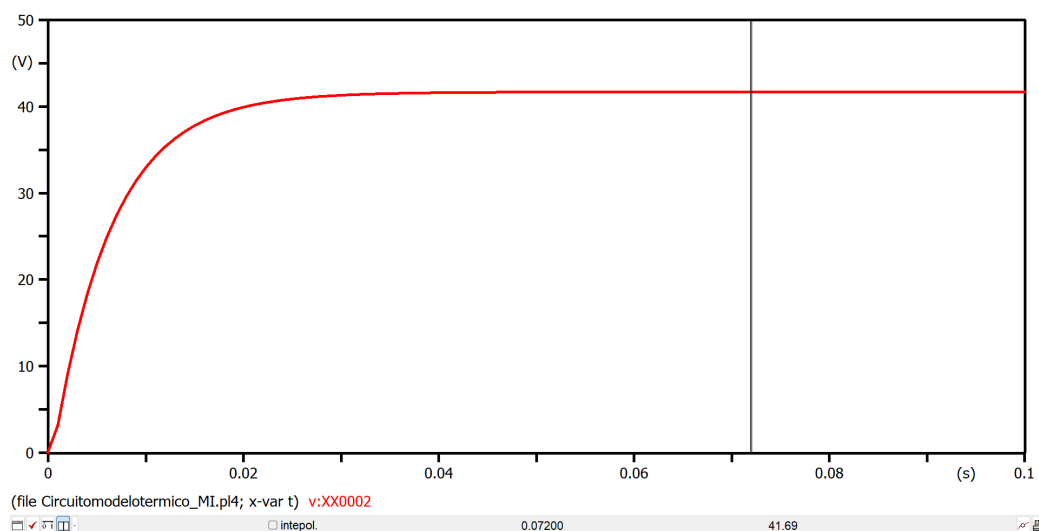


Figura 36: Curva temperatura en el rotor simulación segundo ensayo

En la Fig. 36 se observa la curva para el lado del rotor cuando la máquina alcanza su estado estable de temperatura en 41.69 °C. Esto al colocar cero pérdidas de potencia del lado del estator, lo contrario a la anterior gráfica, tal como se lo realizó en el ensayo en laboratorio.

4.1.5. Comparación entre valores térmicos obtenidos en ensayos en laboratorio y simulación

En la Tabla 16, se comparan los resultados del incremento térmico comparado tanto para el ensayo como en la simulación.

Tabla 16: Datos obtenidos en laboratorio y simulación Ensayos uno y dos en c.c

	Incremento termico Δ_T	
	Ensayo en laboratorio	Simulación
Estator	62.7 °C	62.66 °C
Rotor	43.1 °C	41.69 °C

La comparación de las temperaturas medidas en los ensayos con las obtenidas en la simulación del modelo del motor, demuestra la validez de este modelo térmico. Permite conocer las temperaturas del estator y del rotor del motor de inducción en cada instante del funcionamiento. Esta información proporciona una importante ayuda para la optimización en el uso del motor.

4.2. Simulación modelo térmico tercer ensayo

Este ensayo se lo realizo en laboratorio en corriente alterna con el motor girando en vacío donde el tiempo obtenido de estabilización de temperatura es más rápido. Para este caso en la simulación se ha utilizado el circuito térmico y los parámetros solo para el lado del estator.

Se observa que su incremento de temperatura y constante de tiempo son menores con respecto a las primeras pruebas en corriente directa.

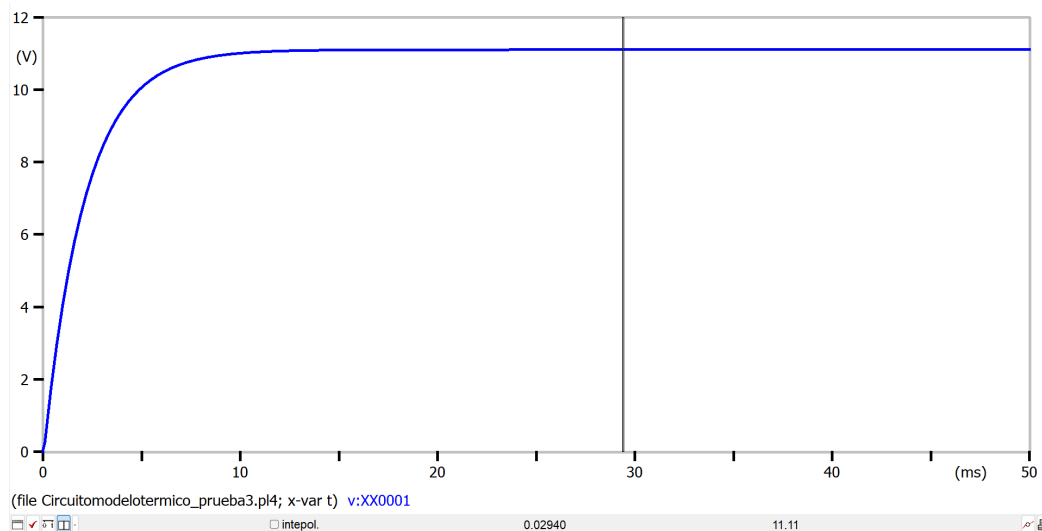


Figura 37: Curva temperatura en el estator motor en vacío.

La Fig. 37 muestra la curva del régimen permanente de temperatura simulado para el tercer ensayo, el cual expresa un valor de incremento térmico de 11.11 °C un valor similar al obtenido en el ensayo de laboratorio.

Tal como el resultado obtenido en laboratorio esta temperatura es bastante menor en comparación con las temperaturas de las dos primeras pruebas.

4.2.1. Comparativa entre valores térmicos obtenidos en ensayos en laboratorio y simulación

Tabla 17: Resultados obtenidos en laboratorio y simulación Ensayo 3 en vacío

	Incremento térmico ΔT	
	Ensayo en laboratorio	Simulación
Estator	11.11 °C	11.11 °C

La Tabla 17 muestra la obtención de un modelo preciso al obtener temperaturas iguales tanto en el ensayo en laboratorio como en la simulación para la prueba tres.

4.3. Simulación modelo térmico con el cuarto ensayo

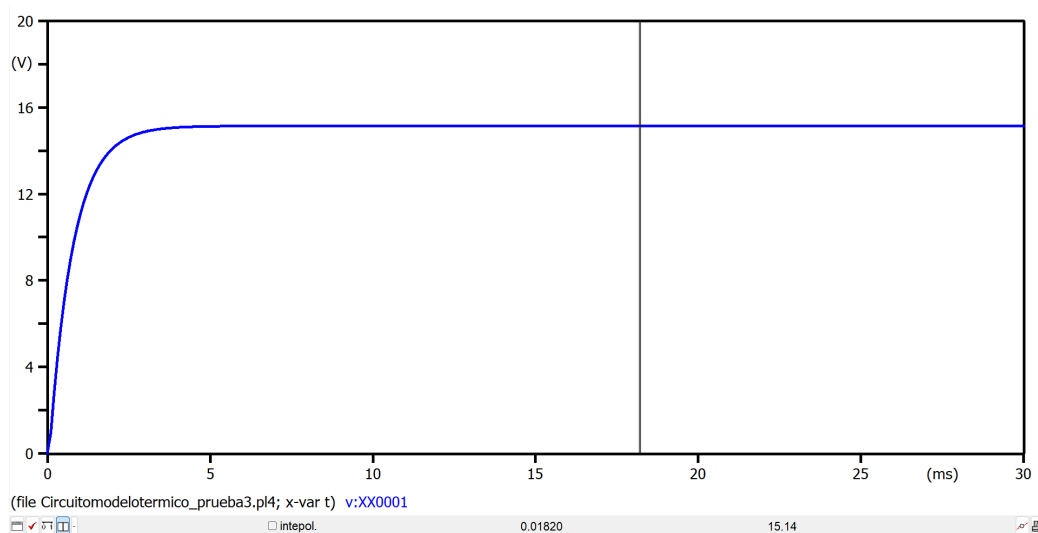


Figura 38: Curva temperatura en el estator motor con carga.

La Fig. 38 muestra la curva del régimen permanente de temperatura simulado para el cuarto ensayo, expresando un valor de incremento térmico de 15.14 °C un valor más alto de temperatura comparado al anterior ensayo en vacío ya que el eje del motor se encuentra sometido a carga y reduce en cierta cantidad su velocidad de giro por lo cual aumenta en cierta cantidad la temperatura y tarda más de tiempo en llegar a estabilizarse, dicho valor de incremento térmico es bastante similar al obtenido en el ensayo en laboratorio por lo cual valida el modelo térmico analizado.

4.3.1. Comparativa entre valores térmicos obtenidos en ensayos en laboratorio y simulación

Tabla 18: Resultados obtenidos en laboratorio y simulación Ensayo 4 motor con carga

	Incremento térmico ΔT	
	Ensayo en laboratorio	Simulación
Estator	15.1502 °C	15.14 °C

Para este análisis en las simulaciones se utilizaron dos modelos térmicos, uno de primer orden y otro de segundo orden.

El de primer orden se ha utilizado para los ensayos en corriente alterna, para el tercer y cuarto ensayo. El modelo de segundo orden para los ensayos en CC se utiliza para analizar los ensayos uno y dos.

5. Conclusiones y Recomendaciones

5.1. Conclusiones

En las máquinas eléctricas y transformadores es fundamental mantener la temperatura dentro de los límites de diseño del convertidor para evitar el deterioro prematuro del aislamiento, que ocasionaría una reducción de su vida útil.

En este trabajo se estudia el modelo térmico de la máquina de inducción y se obtienen sus parámetros mediante mediciones de las temperaturas del estator y rotor para una máquina de rotor bobinado de 4 kW. El modelo térmico se desarrolla a partir de la evaluación de la disipación de potencia mediante un circuito equivalente eléctrico clásico de la máquina, considerando la transferencia de calor y la tasa de aumento de temperatura en el estator y el rotor durante diferentes ensayos.

Se obtuvieron a partir de cuatro diferentes ensayos los parámetros térmicos del modelo térmico de segundo orden. Las dos primeras pruebas se realizan inyectando corriente continua al motor hasta que alcanza la condición de estado estacionario en las temperatura del estator y rotor. Estos ensayos se realizan con el rotor detenido inyectando CC en el estator o en el rotor respectivamente. La duración de estas pruebas son proporcionales al tamaño del motor y para la máquina en ensayo se requirieron más de 8 horas para alcanzar el régimen permanente.

Las pruebas en CA se realizan con la máquina en movimiento, una en condición de vacío y la otra en carga. En estas pruebas solamente se registran temperaturas en el estator debido a la dificultad de medir temperaturas en un rotor en movimiento. Estos ensayos permiten determinar la influencia del accionamiento ventilador acoplado al eje en los parámetros térmicos del modelo. La duración de estas pruebas en corriente alterna requirieron entre 2 y 3 horas para alcanzar el régimen permanente.

Por medio de las cuatro pruebas térmicas realizadas con el motor en diferentes condiciones de funcionamiento se logró obtener los parámetros del modelo térmico de la máquina de inducción, el cual puede ser utilizado para su protección térmica, conociendo las corrientes en el estator y la velocidad de la máquina.

Mediante el modelo analizado de la MI se pudo determinar mediante pruebas en los puntos críticos según su operación que las temperaturas más altas se obtienen en las pruebas en CC dando en la primera prueba un valor

de $62.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ y para alcanzar esta temperatura la constante de tiempo τ es de 9787.4 s y $43.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ con la constante de tiempo de 6525.8 s en la segunda prueba. Como validación de estas pruebas realizadas al plantear el modelo térmico en el programa ATPDraw, se obtuvieron las curvas de temperatura donde fueron similares a las gráficas de las pruebas físicas aplicadas a la MI, dando un valor de temperatura de $62.06\text{ }^{\circ}\text{C}$ en la simulación existiendo un error máximo del 1.03% entre las curvas de la primera prueba y para las curvas de la segunda prueba la temperatura en la simulación fue de $41.69\text{ }^{\circ}\text{C}$ dando un error del 3.3% hasta el instante en el que se obtuvo el régimen permanente de la temperatura.

A partir del análisis matemático de la máquina se comprendió, en primera parte el análisis de su modelo en régimen permanente y su modelo eléctrico clásico hasta obtener sus parámetros, en segunda instancia se planteó su modelo térmico con su respectivo análisis obteniendo las resistencias y capacitancias térmicas.

El análisis térmico realizado al motor de inducción permitirá predecir la vida útil del motor en términos de desgaste térmico y deterioro de los materiales. De esta forma se podrán proponer medidas para prolongar su vida útil, con ajustes en la operación o mejoras en el sistema de refrigeración, utilizando el modelo térmico para explorar diferentes condiciones de operación y determinar cómo estas afectan la temperatura del motor. Esto permitirá identificar las condiciones de operación que reduzcan el desgaste térmico y la temperatura de los devanados.

Un análisis térmico bien realizado contribuirá significativamente a la eficiencia, confiabilidad y vida útil de los motores de inducción. Además ayudará a prevenir problemas relacionados con el sobrecalentamiento.

5.2. Recomendaciones

Es importante considerar detalladamente los datos de placa de la máquina que se analizará para realizar un modelo eléctrico inicial de este convertidor, partiendo de sus valores nominales.

Los ensayos que deben realizarse tienen que considerar tanto la teoría como las normas pertinentes, con lo cual se garantiza la determinación precisa de los parámetros. Esto permitirá evitar evitar desperfectos y pérdida de vida útil de la máquina, daños en los equipos de medición, así como riesgos eléctricos y/o accidentes al operador.

Es recomendable utilizar modelos de segundo orden o superiores para obtener resultados más precisos y específicos. Además es necesario comparar los resultados del modelo térmico obtenido con resultados experimentales reales para validar su precisión. Si hay variaciones significativas, es conveniente corregir el modelo según sea necesario para alcanzar su validación final.

Este tipo de estudio se puede realizar en cualquier tipo de motor de inducción y por tanto se sugiere realizar un análisis térmico en motores de diferentes potencias y tamaños, con la intención de observar como estos factores influirán fundamentalmente en el incremento térmico y tiempo de estabilización térmica.

Referencias

- [1] M. A. Electricos, “Máquinas y accionamientos eléctricos (3m4) (introducción al motor trifásico de inducción),” 2019.
- [2] Siticed.com.mx, “Motor de induccion trifasico, 2020, acceded 14/07/2022.” <https://siticed.com.mx/2020/01/24/motor-de-induccion/>, 2020.
- [3] J. M. Aller, *Maquinas electricas rotativas introduccion a la teoria general*. Editorial Equinoccio, 2008.
- [4] J. Schützhold and W. Hofmann, “Analysis of the temperature dependence of losses in electrical machines,” in *2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, pp. 3159–3165, 2013.
- [5] S. Grubic, J. Aller, and T. Habetler, *Motor diagnostics and protection using inverter capabilities*, pp. 185–252. United Kingdom: Institution of Engineering and Technology, Jan. 2018. Publisher Copyright: © The Institution of Engineering and Technology 2019.
- [6] E. instruments, “Medidor de temperatura de 4 canales con registrador sd extech sdl200,” *Manual de usuario EXTECH*, 2013.
- [7] Fluke, “Termómetros infrarrojos fluke 62 max y 62 max +,” *MANUAL FLUKE*, 2012.
- [8] G. electronic, “Multímetro digital con termocupla,” *Manual multímetro digital DT9208A*, 2018.
- [9] A. Purwar, “A multipurpose sensor for heat flux and temperature measurement: Design and computational analysis,” in *2017 14th IEEE India Council International Conference (INDICON)*, pp. 1–6, 2017.
- [10] Apiem, “Conoce a Michael Faraday, el padre del motor eléctrico, 2017, acceded 23/06/2022,” 2017.
- [11] E. C. Quispe, *Efectos del desequilibrio de tensiones sobre la operación del motor de inducción trifásico. Énfasis en la caracterización del desequilibrio de tensiones y el efecto sobre la potencia*. PhD thesis, Universidad Autónoma de Occidente, May 2015.

- [12] P. Zhang, Y. Du, and T. G. Habetler, "A transfer-function-based thermal model reduction study for induction machine thermal overload protective relays," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 46, no. 5, pp. 1919–1926, 2010.
- [13] A. Safin, A. Kopylov, R. Gibadullin, T. Petrov, R. Khusnutdinov, and O. Fedorov, "Thermal model of a linear electric machine," in *2019 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA)*, pp. 426–428, 2019.
- [14] J. L. Gonzalez-Cordoba, R. A. Osornio-Rios, D. Granados-Lieberman, R. d. J. Romero-Troncoso, and M. Valtierra-Rodriguez, "Thermal-impact-based protection of induction motors under voltage unbalance conditions," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 33, no. 4, pp. 1748–1756, 2018.
- [15] M. Baranski and A. Polak, "Thermographic diagnostic of electrical machines.," in *The XIX International Conference on Electrical Machines - ICEM 2010*, pp. 1–3, 2010.
- [16] S. J. Chapman, *Electric Machinery Fundamentals*, pp. 1–521. McGraw-Hill Companies, Inc., 2012.
- [17] P. S. Barendse and P. Pillay, "The detection of unbalanced faults in inverter-fed induction machines," in *2007 IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives*, pp. 46–51, 2007.
- [18] J. M. Aller, J. A. Restrepo, and J. C. Viola, "Voltage behind reactance model of induction machines using atpdraw and models," in *2021 IEEE Fifth Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM)*, pp. 1–6, 2021.
- [19] J. M. Aller, J. A. Restrepo, and J. C. Viola, "Voltage behind reactance model of the doubly fed induction generator using space vectors," in *2021 IEEE Fifth Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM)*, pp. 1–6, 2021.
- [20] J. Aller, A. Bueno, and T. Paga, "Power system analysis using space-vector transformation," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 17, no. 4, pp. 957–965, 2002.

- [21] B. kruger, “Sobrecalentamiento de motores eléctricos,” *ALL-TEST Pro*, vol. 3, no. 4, pp. 25–56, 2020.
- [22] O. Ejiofor, D. Nnadi, and C. Nwosu, “Fundamentals of thermal modeling of induction machines,” in *Int. conf. of electric power engeniiring (ICEPENG 2015)*, 2015.
- [23] J. Araque–Mora and L. Angel, “Distributed equivalent circuit for modeling heat transfer process in a thermoelectric system,” in *2021 IEEE 5th Colombian Conference on Automatic Control (CCAC)*, pp. 326–331, 2021.
- [24] F. Nishanth, M. Johnson, and E. L. Severson, “A review of thermal analysis and management of power dense electric machines,” in *2021 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC)*, pp. 1–8, 2021.
- [25] R. Seidel, J. Volland, N. Thielen, C. Voigt, and J. Franke, “Experimental investigation on thermocouple attachment methods for reliable temperature measurement,” in *2020 43rd International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)*, pp. 1–6, 2020.

ANEXOS

Anexo A

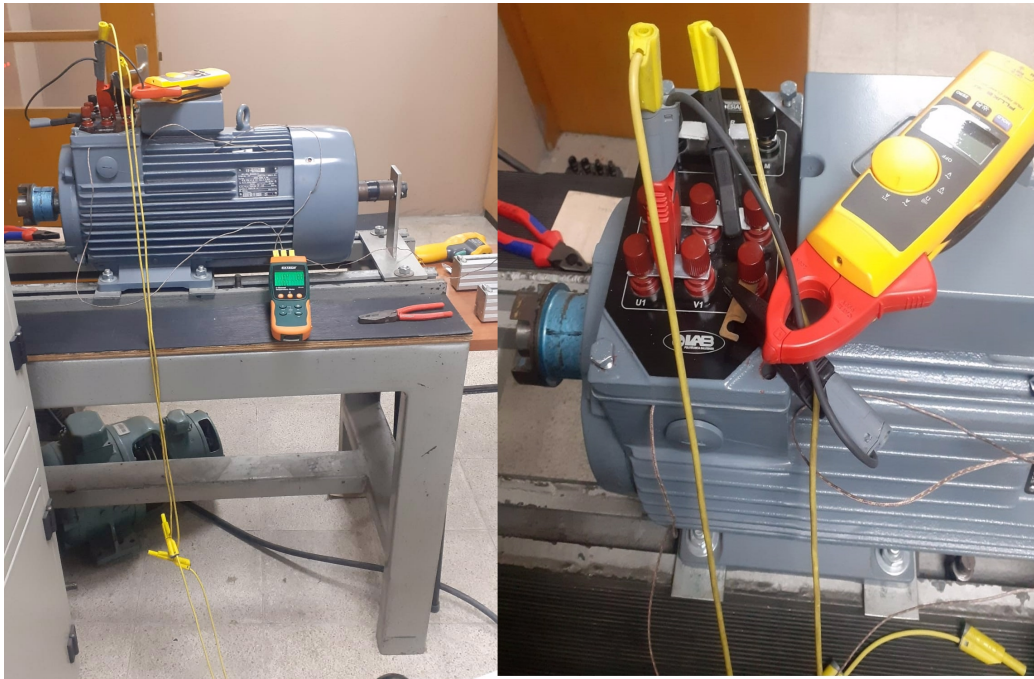


Figura 39: Montaje prueba 1 (desde el lado del estator)

Anexo B

1	A	B	C	D	E	F	G	H	I
	Place	Date	Time	Value	Unit	Value	Unit	Value	Unit
30992	30991	06/07/2023	19:34:23	84.1	T1 KTemp C	77.7	T2 KTemp C	21	T3 KTemp C
30993	30992	06/07/2023	19:34:24	84.1	T1 KTemp C	77.7	T2 KTemp C	21	T3 KTemp C
30994	30993	06/07/2023	19:34:25	84.1	T1 KTemp C	77.7	T2 KTemp C	21	T3 KTemp C
30995	30994	06/07/2023	19:34:26	84.1	T1 KTemp C	77.7	T2 KTemp C	21	T3 KTemp C
30996	30995	06/07/2023	19:34:27	84.1	T1 KTemp C	77.7	T2 KTemp C	21	T3 KTemp C
30997	30996	06/07/2023	19:34:28	84.1	T1 KTemp C	77.7	T2 KTemp C	21	T3 KTemp C
30998	30997	06/07/2023	19:34:29	84.1	T1 KTemp C	77.7	T2 KTemp C	21	T3 KTemp C
30999	30998	06/07/2023	19:34:30	84.1	T1 KTemp C	77.6	T2 KTemp C	21	T3 KTemp C
31000	30999	06/07/2023	19:34:31	84.1	T1 KTemp C	77.6	T2 KTemp C	21	T3 KTemp C
31001	31000	06/07/2023	19:34:32	84.1	T1 KTemp C	77.6	T2 KTemp C	21	T3 KTemp C
31002	31001	06/07/2023	19:34:33	84.1	T1 KTemp C	77.6	T2 KTemp C	21	T3 KTemp C
31003	31002	06/07/2023	19:34:34	84.1	T1 KTemp C	77.6	T2 KTemp C	21	T3 KTemp C
31004	31003	06/07/2023	19:34:35	84.1	T1 KTemp C	77.6	T2 KTemp C	21	T3 KTemp C
31005	31004	06/07/2023	19:34:36	84.1	T1 KTemp C	77.6	T2 KTemp C	21	T3 KTemp C
31006	31005	06/07/2023	19:34:37	84.1	T1 KTemp C	77.6	T2 KTemp C	21	T3 KTemp C
31007	31006	06/07/2023	19:34:38	84.1	T1 KTemp C	77.6	T2 KTemp C	21	T3 KTemp C
31008	31007	06/07/2023	19:34:39	84.1	T1 KTemp C	77.6	T2 KTemp C	21	T3 KTemp C
31009	31008	06/07/2023	19:34:40	84.1	T1 KTemp C	77.6	T2 KTemp C	21	T3 KTemp C
31010	31009	06/07/2023	19:34:41	84.1	T1 KTemp C	77.5	T2 KTemp C	21	T3 KTemp C
31011	31010	06/07/2023	19:34:42	84.1	T1 KTemp C	77.5	T2 KTemp C	21	T3 KTemp C
31012	31011	06/07/2023	19:34:43	84.1	T1 KTemp C	77.5	T2 KTemp C	21	T3 KTemp C
31013	31012	06/07/2023	19:34:44	84.1	T1 KTemp C	77.5	T2 KTemp C	21	T3 KTemp C

Figura 40: Valores obtenidos de temperatura en el estator, rotor y temperatura ambiente en la prueba 1.

Anexo C



Figura 41: Montaje prueba 2 (desde el lado del rotor)

Anexo D

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Place	Date	Time	Value	Unit	Value	Unit	Value	Unit
31276	31275	04/07/2023	19:11:45	41.8	T1 KTemp C	57.2	T2 KTemp C	19.5	T3 KTemp C
31277	31276	04/07/2023	19:11:46	41.8	T1 KTemp C	57.2	T2 KTemp C	19.5	T3 KTemp C
31278	31277	04/07/2023	19:11:47	41.8	T1 KTemp C	57.2	T2 KTemp C	19.5	T3 KTemp C
31279	31278	04/07/2023	19:11:48	41.8	T1 KTemp C	57.2	T2 KTemp C	19.5	T3 KTemp C
31280	31279	04/07/2023	19:11:49	41.8	T1 KTemp C	57.2	T2 KTemp C	19.5	T3 KTemp C
31281	31280	04/07/2023	19:11:50	41.8	T1 KTemp C	57.1	T2 KTemp C	19.5	T3 KTemp C
31282	31281	04/07/2023	19:11:51	41.8	T1 KTemp C	57.1	T2 KTemp C	19.5	T3 KTemp C
31283	31282	04/07/2023	19:11:52	41.8	T1 KTemp C	57.1	T2 KTemp C	19.5	T3 KTemp C
31284	31283	04/07/2023	19:11:53	41.8	T1 KTemp C	57.1	T2 KTemp C	19.5	T3 KTemp C
31285	31284	04/07/2023	19:11:54	41.8	T1 KTemp C	57.1	T2 KTemp C	19.5	T3 KTemp C
31286	31285	04/07/2023	19:11:55	41.8	T1 KTemp C	57.1	T2 KTemp C	19.4	T3 KTemp C
31287	31286	04/07/2023	19:11:56	41.8	T1 KTemp C	57.1	T2 KTemp C	19.4	T3 KTemp C
31288	31287	04/07/2023	19:11:57	41.8	T1 KTemp C	57.1	T2 KTemp C	19.4	T3 KTemp C
31289	31288	04/07/2023	19:11:58	41.8	T1 KTemp C	57.1	T2 KTemp C	19.4	T3 KTemp C
31290	31289	04/07/2023	19:11:59	41.8	T1 KTemp C	57.1	T2 KTemp C	19.4	T3 KTemp C
31291	31290	04/07/2023	19:12:00	41.8	T1 KTemp C	57	T2 KTemp C	19.3	T3 KTemp C
31292	31291	04/07/2023	19:12:01	41.8	T1 KTemp C	57	T2 KTemp C	19.3	T3 KTemp C
31293	31292	04/07/2023	19:12:02	41.8	T1 KTemp C	57	T2 KTemp C	19.3	T3 KTemp C
31294	31293	04/07/2023	19:12:03	41.8	T1 KTemp C	57	T2 KTemp C	19.2	T3 KTemp C
31295	31294	04/07/2023	19:12:04	41.8	T1 KTemp C	57	T2 KTemp C	19.2	T3 KTemp C
31296	31295	04/07/2023	19:12:05	41.8	T1 KTemp C	57	T2 KTemp C	19.2	T3 KTemp C
31297	31296	04/07/2023	19:12:06	41.8	T1 KTemp C	56.9	T2 KTemp C	19.2	T3 KTemp C

Figura 42: Valores obtenidos de temperatura en el estator, rotor y temperatura ambiente en la prueba 2.

Anexo E

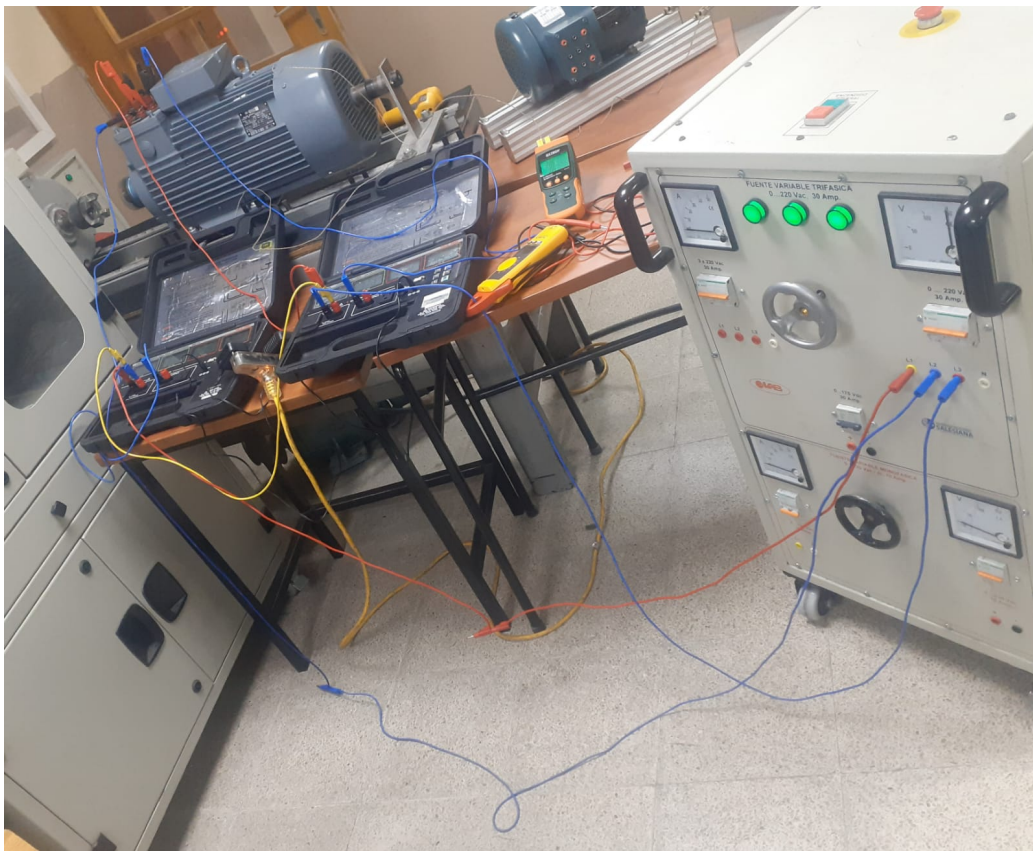


Figura 43: Montaje prueba 3 motor en vacío

Anexo F

	A	B	C	D	E	F	G
1	Place	Date	Time	Value	Unit	Value	Unit
6503	6502	18/07/2023	17:12:49	29.3	T1 KTemp C	18.7	T2 KTemp C
6504	6503	18/07/2023	17:12:50	29.3	T1 KTemp C	18.7	T2 KTemp C
6505	6504	18/07/2023	17:12:51	29.3	T1 KTemp C	18.7	T2 KTemp C
6506	6505	18/07/2023	17:12:52	29.3	T1 KTemp C	18.7	T2 KTemp C
6507	6506	18/07/2023	17:12:53	29.3	T1 KTemp C	18.7	T2 KTemp C
6508	6507	18/07/2023	17:12:54	29.3	T1 KTemp C	18.7	T2 KTemp C
6509	6508	18/07/2023	17:12:55	29.3	T1 KTemp C	18.7	T2 KTemp C
6510	6509	18/07/2023	17:12:56	29.3	T1 KTemp C	18.7	T2 KTemp C
6511	6510	18/07/2023	17:12:57	29.4	T1 KTemp C	18.7	T2 KTemp C
6512	6511	18/07/2023	17:12:58	29.4	T1 KTemp C	18.7	T2 KTemp C
6513	6512	18/07/2023	17:12:59	29.4	T1 KTemp C	18.7	T2 KTemp C
6514	6513	18/07/2023	17:13:00	29.4	T1 KTemp C	18.7	T2 KTemp C
6515	6514	18/07/2023	17:13:01	29.4	T1 KTemp C	18.7	T2 KTemp C
6516	6515	18/07/2023	17:13:02	29.4	T1 KTemp C	18.7	T2 KTemp C
6517	6516	18/07/2023	17:13:03	29.4	T1 KTemp C	18.7	T2 KTemp C
6518	6517	18/07/2023	17:13:04	29.5	T1 KTemp C	18.7	T2 KTemp C
6519	6518	18/07/2023	17:13:05	29.5	T1 KTemp C	18.7	T2 KTemp C
6520	6519	18/07/2023	17:13:06	29.5	T1 KTemp C	18.7	T2 KTemp C
6521	6520	18/07/2023	17:13:07	29.5	T1 KTemp C	18.7	T2 KTemp C
6522	6521	18/07/2023	17:13:08	29.5	T1 KTemp C	18.7	T2 KTemp C
6523	6522	18/07/2023	17:13:09	29.5	T1 KTemp C	18.7	T2 KTemp C
6524	6523	18/07/2023	17:13:10	29.5	T1 KTemp C	18.7	T2 KTemp C

Figura 44: Valores totales obtenidos de temperatura en el estator y temperatura ambiente en la prueba 3 en AC.

Anexo G



Figura 45: Montaje prueba 4 motor con carga

Anexo H

	A	B	C	D	E	F	G
1	Place	Date	Time	Value	Unit	Value	Unit
9166	9165	24/07/2023	18:51:36	34.5	T1 KTemp C	18.5	T2 KTemp C
9167	9166	24/07/2023	18:51:37	34.5	T1 KTemp C	18.5	T2 KTemp C
9168	9167	24/07/2023	18:51:38	34.5	T1 KTemp C	18.5	T2 KTemp C
9169	9168	24/07/2023	18:51:39	34.5	T1 KTemp C	18.5	T2 KTemp C
9170	9169	24/07/2023	18:51:40	34.5	T1 KTemp C	18.5	T2 KTemp C
9171	9170	24/07/2023	18:51:41	34.5	T1 KTemp C	18.5	T2 KTemp C
9172	9171	24/07/2023	18:51:42	34.5	T1 KTemp C	18.5	T2 KTemp C
9173	9172	24/07/2023	18:51:43	34.5	T1 KTemp C	18.5	T2 KTemp C
9174	9173	24/07/2023	18:51:44	34.5	T1 KTemp C	18.5	T2 KTemp C
9175	9174	24/07/2023	18:51:45	34.5	T1 KTemp C	18.5	T2 KTemp C
9176	9175	24/07/2023	18:51:46	34.5	T1 KTemp C	18.5	T2 KTemp C
9177	9176	24/07/2023	18:51:47	34.5	T1 KTemp C	18.5	T2 KTemp C
9178	9177	24/07/2023	18:51:48	34.5	T1 KTemp C	18.5	T2 KTemp C
9179	9178	24/07/2023	18:51:49	34.5	T1 KTemp C	18.5	T2 KTemp C
9180	9179	24/07/2023	18:51:50	34.5	T1 KTemp C	18.5	T2 KTemp C
9181	9180	24/07/2023	18:51:51	34.5	T1 KTemp C	18.5	T2 KTemp C
9182	9181	24/07/2023	18:51:52	34.5	T1 KTemp C	18.5	T2 KTemp C
9183	9182	24/07/2023	18:51:53	34.5	T1 KTemp C	18.5	T2 KTemp C
9184	9183	24/07/2023	18:51:54	34.5	T1 KTemp C	18.5	T2 KTemp C
9185	9184	24/07/2023	18:51:55	34.5	T1 KTemp C	18.5	T2 KTemp C
9186	9185	24/07/2023	18:51:56	34.5	T1 KTemp C	18.5	T2 KTemp C
9187	9186	24/07/2023	18:51:57	34.5	T1 KTemp C	18.5	T2 KTemp C

Figura 46: Valores obtenidos de temperatura en el estator y temperatura ambiente en la prueba 4 en AC.

Anexo I



Figura 47: Tomas de temperatura sensor infrarrojo FLUKE