



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

Máster Universitario en Ingeniería del Mantenimiento

Trabajo Final de Máster

ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DE LOS MOTORES DE INDUCCIÓN QUE OPERAN BAJO DIFERENTES CONDICIONES DE FALLOS

Autor: Herrera Guachamin Jonathan Giovanni

Director: Dr. Antonino Daviu José Alfonso

Valencia, noviembre 2018

RESUMEN

La presencia de distintas anomalías o defectos en un motor eléctrico puede acarrear consecuencias catastróficas, como paradas intempestivas de la propia máquina con las consiguientes interrupciones de la producción y costes de reparación. Además de ello, otra consecuencia colateral de la presencia de averías y anomalías, todavía no muy estudiada, es la disminución en la eficiencia de la propia máquina. En el contexto actual, en el que las normas internacionales están forzando a la utilización de motores de eficiencia mejorada, la operación del motor bajo distintos tipos de avería puede resultar especialmente gravosa, ya que la eficiencia real de la máquina se puede ver seriamente afectada.

El presente trabajo pretende evaluar las repercusiones en términos de eficiencia de la presencia de distintos tipos de avería en motores de inducción. El objeto es desarrollar una amplia gama de ensayos de laboratorio en los que se computen las curvas de eficiencia del motor para diferentes niveles de carga y bajo diferentes tipos de avería. El objetivo es determinar en qué medida la eficiencia de la máquina se ve comprometida por la presencia de los distintos tipos de fallo. En concreto, los siguientes tipos de fallo serán estudiados en el trabajo: fallos en el rotor, asimetrías en el devanado del estator, fallos en el sistema de aislamiento, excentricidades/desalineamientos y fallos en el sistema de ventilación.

ABSTRACT

The presence of different anomalies or defects in an electric motor can have catastrophic consequences, such as untimely stops of the machine itself with consequent production interruptions and repair costs. In addition to this, another collateral consequence of the presence of faults and anomalies, still not very studied, is the decrease in the efficiency of the machine itself. In the current context, in which international standards are forcing the use of engines of improved efficiency, the operation of the engine under different types of damage can be especially burdensome, since the real efficiency of the machine can be seriously affected.

The present work tries to evaluate the repercussions in terms of efficiency of the presence of different types of failure in induction motors. The purpose is to develop a wide range of laboratory tests in which the engine efficiency curves are computed for different load levels and under different types of failure. The objective is to determine to what extent the efficiency of the machine is compromised by the presence of the different types of failure. In particular, the following types of failures will be studied at work: rotor faults, asymmetries in the stator winding, insulation system failures, eccentricities/misalignments and faults in the ventilation system.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivos.....	2
1.2. Antecedentes	2
2. MARCO TEÓRICO.....	3
2.1. Motores de inducción.....	3
2.2. Características constructivas.....	3
2.2.1. Estator.....	4
2.2.2. Rotor	4
2.2.2.1. Rotor bobinado.....	5
2.2.2.2. Rotor jaula de ardilla.....	5
2.3. Grado de protección de los motores.....	6
2.4. Clase de servicio	7
2.5. Clase térmica.....	8
2.6. Eficiencia de los motores de inducción	8
2.6.1. Normativa IEC 60034-2-1	10
2.6.2. Normativa IEC 60034-30	11
2.6.3. Clases de eficiencia	11
2.6.4. Modificaciones en la construcción de motores de inducción	12
2.7. Fallos en los motores de inducción.....	12
2.7.1. Fallos mecánicos	13
2.7.1.1. Fallos en rodamientos	13
2.7.1.2. Rotor desequilibrado	14
2.7.1.3. Desalineación de ejes	14
2.7.2. Asimetrías rotóricas.....	15
2.7.2.1. Rotura de barras rotóricas	15
2.7.2.2. Rotura de anillos rotóricos	16

2.7.2.3. Excentricidades	16
2.7.3. Defectos en el sistema aislante	18
2.7.4. Fallos en el paquete magnético.....	18
3. METODOLOGÍA	19
3.1. Caracterización de los equipos.....	19
3.2. Procedimiento	23
3.2.1. Fallos en el rotor	24
3.2.2. Asimetrías en el devanado del estator	25
3.2.3. Excentricidad/desalineamientos	26
3.2.4. Sistema de ventilación	27
3.2.5. Sistema de aislamiento	27
4. RESULTADOS	28
4.1. Evaluación de la eficiencia con fallos en el rotor	30
4.2. Evaluación de la eficiencia con fallos asimétricos en el devanado del estator	32
4.3. Fallos en el sistema de aislamiento	40
4.4. Excentricidades	46
4.5. Fallos en el sistema de ventilación	52
5. CONCLUSIONES	54
6. BIBLIOGRAFÍA.....	56
7. ANEXOS.....	57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Partes del motor de inducción. [1]	4
Figura 2. Estator de un motor de inducción con sus respectivos devanados.....	4
Figura 3. Rotor bobinado. [2]	5
Figura 4. Rotor jaula de ardilla.....	5
Figura 5. Diagrama de flujo de potencia de un motor de inducción. [4].....	9
Figura 6. Rodamiento con fallo	13
Figura 7. Desequilibrio estático.....	14
Figura 8. Desequilibrio dinámico	14
Figura 9. Desalineación de ejes en acoples de máquinas	15
Figura 10. Ensayo destructivo de rotura de barras rotóricas	16
Figura 11. Rozamiento del rotor con el estator debido a excentricidades [8]	16
Figura 12. Excentricidad estática.....	17
Figura 13. Excentricidad dinámica.....	17
Figura 14. Excentricidad mixta	17
Figura 15. Fallo en el sistema de asilamiento.....	18
Figura 16. Equipo utilizado para realizar los diferentes ensayos	19
Figura 17. Transductor de torque	21
Figura 18. Indicador de torque y fuente de alimentación	21
Figura 19. Tacómetro digital HIBOK 23.....	21
Figura 20. Analizador de redes eléctricas.....	22
Figura 21. Fuente de voltaje externa de DC	22
Figura 22. Representación de las conexiones para los ensayos.....	24
Figura 23. Rotor con 9 barras rotas consecutivas.....	24
Figura 24. Representación de las conexiones realizadas para generar asimetrías en el devanado del estator	25
Figura 25. Desalineamiento horizontal del motor	26
Figura 26. Desalineamiento vertical del motor	26
Figura 27. Excentricidad debido a incorrecta sujeción de la base del motor	26
Figura 28. Fallo en el sistema de ventilación del motor.....	27
Figura 29. Fallo en el sistema de aislamiento en 2 fases de los devanados.....	27
Figura 30. Fallo en el sistema de aislamiento por sobrecalentamiento	27
Figura 31. Eficiencia vs Nivel de carga del motor sano.....	29

Figura 32. Comparación del desarrollo de la eficiencia de un motor sano con un motor con 9 barras rotas.....	31
Figura 33. Comparación del desarrollo de la eficiencia de un motor sano con un motor con asimetría en el devanado.....	33
Figura 34. Comparación del desarrollo de la eficiencia de un motor sano con un motor con asimetría en el devanado.....	35
Figura 35. Comparación del desarrollo de la eficiencia de un motor sano con un motor con asimetría en el devanado.....	37
Figura 36. Comparación del desarrollo de la eficiencia de un motor sano con un motor con asimetría en el devanado.....	39
Figura 37. Comparación del desarrollo de la eficiencia de un motor sano con un motor con diferentes asimetrías en el devanado	39
Figura 38. Comparación del desarrollo de la eficiencia de un motor sano con un motor con fallo en el aislamiento	41
Figura 39. Comparación del desarrollo de la eficiencia de un motor sano con un motor con fallo en el aislamiento y con temperatura elevada.....	43
Figura 40. Comparación del desarrollo de la eficiencia de un motor sano con un motor con fallos en el aislamiento y temperatura elevada	45
Figura 41. Comparación del desarrollo de la eficiencia de un motor sano con un motor con excentricidad horizontal.....	47
Figura 42. Comparación del desarrollo de la eficiencia de un motor sano con un motor con excentricidad vertical.....	49
Figura 43. Comparación del desarrollo de la eficiencia de un motor sano con un motor con excentricidad debido al aflojamiento en los pernos de anclaje del motor	51
Figura 44. Comparación del desarrollo de la eficiencia de un motor sano con un motor con ventilación obstruida.....	53

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Grados de protección IP. [3].....	6
Tabla 2. Clase térmica del aislamiento en motores	8
Tabla 3. Diferencia de temperatura entre el punto más caliente y la temperatura media. 8	
Tabla 4. Métodos para determinar la eficiencia según la norma IEC 60034-2-1. [5]	10
Tabla 5. Modificaciones de la normativa IEC 60034-30. [6].....	11
Tabla 6. Clases y equivalencia de eficiencia en motores eléctricos. [6]	12
Tabla 7. Características del motor de inducción.....	20
Tabla 8. Características de la máquina DC.....	20
Tabla 9. Características del analizador de redes eléctricas. [9].....	22
Tabla 10. Valores del ensayo realizado en el motor sano	28
Tabla 11. Valores del ensayo realizado con un rotor con 9 barras rotas consecutivas... 30	
Tabla 12. Valores del ensayo realizado con la primera asimetría en el devanado	32
Tabla 13. Valores del ensayo realizado con la segunda asimetría en el devanado.....	34
Tabla 14. Valores del ensayo realizado con la tercera asimetría en el devanado.....	36
Tabla 15. Valores del ensayo realizado con la cuarta asimetría en el devanado.....	38
Tabla 16. Valores del ensayo realizado con fallos en el aislamiento	40
Tabla 17. Valores del ensayo realizado con fallos en el aislamiento y con temperatura elevada.....	42
Tabla 18. Valores del ensayo realizado de un motor con fallos en el aislamiento y temperatura elevada.....	44
Tabla 19. Valores del ensayo realizado con excentricidad horizontal en el motor	46
Tabla 20. Valores del ensayo realizado con excentricidad vertical en el motor	48
Tabla 21. Valores del ensayo realizado de un motor con excentricidad debido al aflojamiento en los pernos de anclaje.....	50
Tabla 22. Valores del ensayo realizado de un motor con ventilación obstruida	52

1. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, los motores eléctricos son las más máquinas rotativas con mayor participación en el ámbito industrial, dentro de los cuales el más utilizado es el motor de inducción por las ventajas que ofrece en cuestión de robustez, fiabilidad y fácil accionamiento.

Si bien se habla de que los motores de inducción son muy fiables, no son inmunes a averías o fallos que se dan por consecuencia de su uso. El desgaste, la fatiga mecánica, la fatiga térmica y factores externos permiten con el tiempo la aparición de distintas anomalías o defectos en el motor teniendo como consecuencias, como paradas imprevistas de la propia máquina representando costes no programados de reparación.

Una correcta gestión de mantenimiento garantiza una máxima rentabilidad económica para las empresas, debido a que se reducen las apariciones de averías en los motores y se evitan paradas no programadas de producción.

Además de lo anterior, la eficiencia de los motores juega un papel fundamental en ahorros de coste por funcionamiento, ya que un motor de alta eficiencia consume menos energía eléctrica que un motor con eficiencia estándar para suministrar la misma potencia. De esta manera, a la hora de seleccionar o cambiar un motor, elegir uno con alta eficiencia en comparación a uno con estándar, la inversión en la diferencia de costes entre ambos, se la puede retornar en términos de costes energéticos a corto plazo.

El presente trabajo busca analizar la repercusión que tiene la eficiencia de los motores cuando trabajan en diferentes condiciones de fallo.

1.1. Objetivos

Objetivo General

El objetivo general del presente trabajo es estudiar y evaluar cómo varía la eficiencia de los motores de inducción cuando operan bajo diferentes condiciones de fallo.

Objetivos específicos

Los objetivos específicos del trabajo se pueden concretar en:

- Medir la potencia eléctrica y determinar la potencia mecánica de los motores a diferentes niveles de carga para conocer la evolución de la eficiencia energética.
- Conocer los fallos más comunes de los motores para generar o tratar de replicar los mismos en los motores del laboratorio.
- Conocer la eficiencia de un motor en estado sano y establecer como referencia para los ensayos con motores con fallos.
- Comparar la evolución de la eficiencia de los motores con fallos con la del motor sano para conocer la reducción de la misma a plena carga.

1.2. Antecedentes

El estudio de la eficiencia de los motores de inducción que trabajan en condiciones de fallo es muy reducido y de gran interés conocer cómo la presencia de una avería, aunque sea en estado incipiente, afecta al rendimiento.

El artículo “Efficiency assessment of induction motors operating under different fault conditions” (referencia [12]) se toma como base para el desarrollo de este trabajo. El citado artículo trata sobre la evaluación mediante análisis experimentales en los motores de inducción que operan bajo dos tipos concretos de fallo: el primero se centra en la rotura de barras rotóricas y el segundo se enfoca en los fallos en los rodamientos. Los resultados obtenidos fueron de gran interés dado que no se suelen tener presentes las consecuencias que la presencia de un fallo tiene a efectos de disminución de eficiencia y son muy escasos los trabajos que han abordado esta cuestión.

2. MARCO TEÓRICO

Los motores eléctricos son máquinas que transforman la energía eléctrica en energía mecánica, estos motores pueden alimentarse con corriente alterna o continua.

Este trabajo se centra en los motores de corriente alterna y, de forma específica, en los motores asíncronos o de inducción.

2.1. Motores de inducción

El principio de funcionamiento de los motores de inducción se basa en la ley de Faraday; cuando un conductor (inducido) está en presencia de un campo magnético variable en el tiempo (inductor) aparece una corriente sobre él generando una fuerza electromotriz permitiendo girar al eje del motor.

La velocidad del campo magnético giratorio se la conoce como velocidad de sincronismo. El rotor trata de seguir al campo magnético debido a que el inducido depende del inductor para que fluya corriente en el devanado del rotor y genere el giro, la velocidad de giro del motor depende de la carga de arrastre; en vacío la velocidad del motor es muy parecida a la velocidad de sincronismo, cuando el carga de arrastre aumenta, la velocidad del motor se reduce, induciendo más corriente en los devanados del rotor y aumentando el par.

Por este principio de funcionamiento a los motores de inducción se los conoce como motores asíncronos siendo su velocidad menor a la velocidad de sincronismo.

2.2. Características constructivas

El motor de inducción está formado principalmente por dos partes: un estator que es la parte fija y un rotor que es la parte móvil. El espacio que separa rotor y estator se conoce como entrehierro. El rotor es capaz de girar gracias a elementos auxiliares como rodamientos y cojinetes. La carcasa del motor contiene al estator y sirve para la proteger a todos los elementos internos del motor. En muchos casos, el motor de inducción se refrigera con ayuda de un ventilador dispuesto en el eje de la parte posterior del motor. En la Figura 1 se puede observar las partes de un motor de inducción de pequeña potencia.

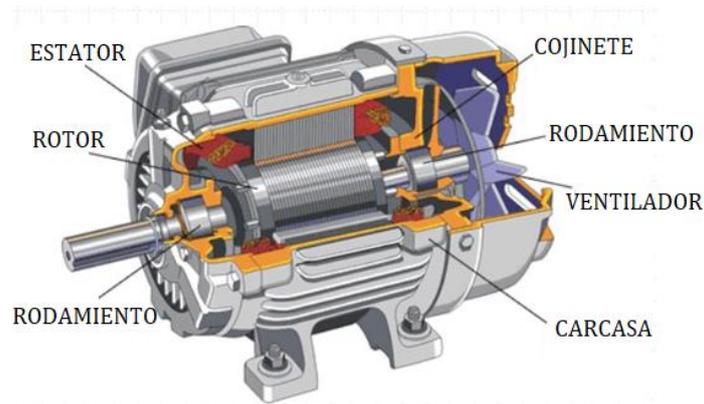


Figura 1. Partes del motor de inducción. [1]

2.2.1. Estator

El estator está formado por láminas de acero al silicio sobre las cuales se practican unas ranuras en las que se alojan los devanados trifásicos y sirve para generar el campo magnético giratorio en el entrehierro. Las capas de láminas de acero están aisladas entre sí para evitar calentamientos y pérdidas indeseadas por la circulación de corrientes parásitas. En la Figura 2 se observa el estator de un motor de inducción.



Figura 2. Estator de un motor de inducción con sus respectivos devanados

Los motores eléctricos tanto síncronos como asíncronos (inducción) tienen el mismo estator, es decir, que no varía en su construcción.

2.2.2. Rotor

La construcción del rotor es análoga a la del estator; se encuentra formado por capas de acero al silicio aisladas entre sí, formando un cilindro en el que hay practicadas unas ranuras en las que se alojan las correspondientes barras o bobinas. Este cilindro está unido al eje del motor.

Los motores asíncronos o de inducción dependiendo del tipo de rotor se clasifican en: motores con rotor bobinado y motores con rotor jaula de ardilla.

2.2.2.1. Rotor bobinado

En un motor de rotor bobinado, también conocido como de anillos rozantes, el devanado del rotor es un devanado trifásico basado en una serie de bobinas conectadas en configuración estrella y que se encuentran distribuidas simétricamente en las ranuras del cilindro formado por el paquete de chapas. Los terminales del devanado se encuentran conectados a un sistema de anillos rozantes ubicado sobre el eje del motor en la parte interna. Este tipo de rotor permite acceder a las escobillas e insertar resistencias en serie; las resistencias se intercalan durante el arranque y se cortocircuitan una vez concluido éste, obteniendo así un mejor par de arranque y limitando los picos de corriente de arranque. En la Figura 3 se observa una representación del rotor bobinado.



Figura 3. Rotor bobinado. [2]

2.2.2.2. Rotor jaula de ardilla

En este tipo de rotor, el devanado del rotor está formado por una serie de barras cortocircuitadas en sus extremos a través de unos anillos, que conforman lo que se conoce como “jaula de ardilla”. La construcción de la jaula de ardilla puede ser: con barras de aluminio fundido inyectado a presión, con barras de cobre fundido inyectado a presión, de barras de aluminio prefabricadas y barras de cobre prefabricado y actúan a modo de inducido. En la Figura 4 se observa un rotor jaula de ardilla con sus diferentes partes.



Figura 4. Rotor jaula de ardilla

Los motores de inducción con rotor jaula de ardilla son los más utilizados debido a su robustez, bajo coste (en comparación a motores de inducción con rotor bobinado para una misma potencia), sencillez y fácil mantenimiento.

2.3. Grado de protección de los motores

Los motores pueden operar en cualquier sector, tanto industrial como doméstico, teniendo cada uno su propio ambiente de trabajo. A la hora de adquirir un motor se debe tomar en cuenta el factor ambiente de trabajo ya que esto permitirá que los motores operen en condiciones de suciedad, humedad, presencia de agua, dependiendo de la aplicación.

La norma IEC 60034-5 define el grado de protección IP que se pueden tener en los motores. En la Tabla 1 se puede observar los diferentes grados de protección.

Código IP	1ª Cifra Protección contra entrada de cuerpos sólidos	2ª Cifra Protección contra entrada de agua
IP11	Protegida contra cuerpos sólidos superiores a 50 mm	Protegida contra la caída vertical de gota de agua
IP12	Protegida contra cuerpos sólidos superiores a 12 mm	Protegida contra la caída de agua con una inclinación máxima de 15°
IP23		Protegida contra el agua en forma de lluvia
IP44	Protegida contra cuerpos sólidos superiores a 1 mm	Protegida contra las proyecciones de agua
IP54	Protegida contra el polvo. (El ingreso de polvo no está totalmente prevenido)	
IP55		Protegida contra chorros
IP56		Protegida contra los efectos de inmersión
IP57		Protegida contra la inmersión moderada
IP58		
IP65	Protegida contra el polvo	Protegida contra chorros de agua en cualquier dirección

Tabla 1. Grados de protección IP. [3]

2.4. Clase de servicio

Según la norma UNE 20-113-73 se define como servicio al conjunto de regímenes, incluyendo los periodos de funcionamiento en vacío y reposo, a los que está sometida una máquina, teniendo en cuenta su duración y secuencia en el tiempo.

Los motores pueden trabajar con diferentes clases de servicio como son: continuo, temporal, periódico o no periódico. La norma IEC 60034-1 define el servicio de los motores eléctricos, tomando en cuenta factores como: carga de arrastre, número de arranques del motor, frenado eléctrico, tiempo de funcionamiento, reposo. Todos estos factores influyen para que el motor trabaje con un equilibrio térmico.

La norma define 10 tipos de servicio:

- S1 Servicio continuo: Esta clase de servicio especifica que el motor está diseñado para trabajar con una carga constante y con una determinada duración para alcanzar el equilibrio térmico. Estos motores al ser construidos para trabajos convencionales (8 horas de continuas) son los más comercializados.
- S2 Servicio temporal: El motor es diseñado para trabajar con una carga constante en un corto trabajo de tiempo, el motor no alcanza el equilibrio térmico.
- S3, S4, S5 Servicio intermitente: Los motores con este tipo de servicio están diseñados para trabajar con carga constante, durante el funcionamiento el motor no debe de llegar al equilibrio térmico de esta manera en el tiempo de parada la temperatura interna del motor se reduce a la del ambiente antes de comenzar el ciclo de trabajo.
- S6, S7, S8 Servicio ininterrumpido: Los motores con este tipo de servicio están diseñados para trabajar en ciclos con determinado tiempo a carga constante y otro tiempo en vacío o en menor velocidad.
- S9 Servicio con variaciones no periódicas de carga y velocidad: La norma define que los motores con este servicio pueden trabajar con tiempos no periódicos y admite ligeras sobrecargas.
- S10 Servicio con carga constante diferente: Los motores eléctricos que presentan este tipo de servicio pueden trabajar hasta 4 cargas diferentes, el motor con cada carga tiene que llegar al equilibrio térmico.

2.5. Clase térmica

La clase térmica indica la máxima temperatura que puede soportar el aislamiento su punto más caliente. La norma UNE 21-304, define los tipos de clases térmicas del aislamiento, el cual depende de los materiales aislantes utilizados como se observa en la Tabla 2.

Clase térmica	Temperatura límite (°C)
Y	90
A	105
E	120
B	130
F	155
H	180
200	200
220	220
250	250

Tabla 2. Clase térmica del aislamiento en motores

La norma también establece que la temperatura ambiente de trabajo no supere los 40°C para todas las clases térmicas y también define las diferencias de temperatura entre el punto más caliente y la temperatura media. Ver Tabla 3.

Clase térmica del Aislamiento	Diferencia de temperatura (°C)
A	5
E	5
B	10
F	15
H	15

Tabla 3. Diferencia de temperatura entre el punto más caliente y la temperatura media

Los fabricantes de los motores estiman un funcionamiento satisfactorio del aislamiento, siempre y cuando se trabaje bajo condiciones normales y con su respectivo servicio. La duración del material aislante puede ser de hasta 40 años en máquinas grandes, 30 para medianas y 20 para pequeñas (valores orientativos).

La vida de un aislante eléctrico se reduce a la mitad cuando se supera de 8 a 10 °C la temperatura máxima de trabajo (clase térmica), según la ley de Montsinger.

2.6. Eficiencia de los motores de inducción

Los motores eléctricos transforman la potencia eléctrica en potencia mecánica, esta transformación no es cien por ciento útil debido a que existen pérdidas de diferentes tipos.

La eficiencia de los motores es la relación de la potencia útil que proporciona el motor en el eje (potencia mecánica, P_m) y la potencia eléctrica demandada (P_e) que es la que suministra la red eléctrica, como se representa en la Ecuación 1.

$$\eta = \frac{P_m}{P_e} * 100\% \quad \text{Ecuación 1}$$

Toda la potencia eléctrica suministrada no se transforma en potencia mecánica, debido a que en el proceso se generan diferentes tipos de pérdidas, tomando en cuenta estos conceptos la eficiencia se la puede expresar como se muestra en la Ecuación 2.

$$\eta = \frac{P_e - P_{pérd}}{P_e} * 100\% \quad \text{Ecuación 2}$$

Las pérdidas del motor vienen dadas debido a: pérdidas en el cobre del estator, pérdidas en el núcleo magnético, pérdidas en el cobre del rotor, pérdidas por fricción y rozamiento y pérdidas misceláneas como se muestra en la Figura 5.

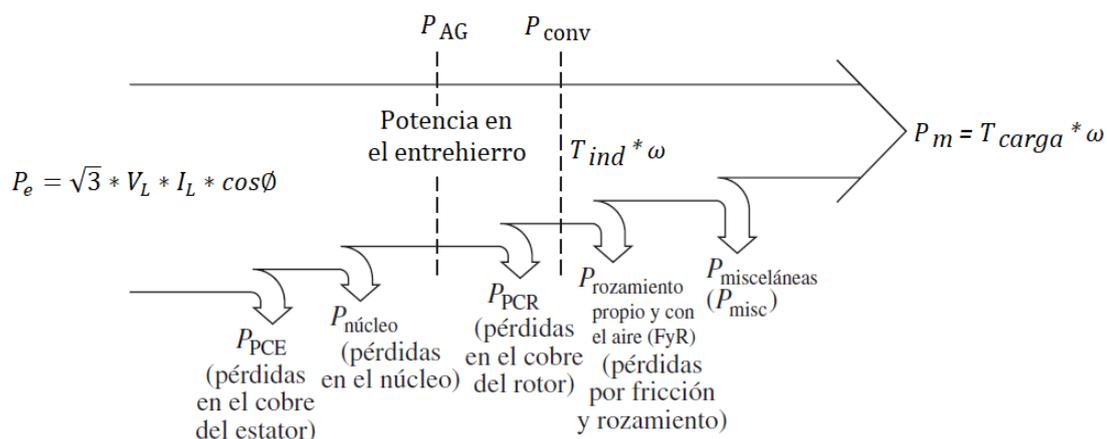


Figura 5. Diagrama de flujo de potencia de un motor de inducción. [4]

Las pérdidas eléctricas vienen dadas por el cuadrado de la intensidad multiplicado la resistencia $I^2 * R$, estas pérdidas son ocasionadas por la disipación de energía en forma de calor por efecto Joule, debido a la resistividad que presentan los devanados del estator, a estas pérdidas se las conoce también como pérdidas en el cobre.

Las pérdidas en el núcleo se dan en el material por el cual está formado, en donde existen pérdidas por histéresis que sufre el material al magnetizarse debido al campo magnético variable y a las corrientes parásitas o corrientes de Foucault que se dan por el espesor del material, ambas pérdidas producen calor en el núcleo.

Las pérdidas en el cobre del rotor vienen dadas de la misma forma que de las del estator.

Las pérdidas por fricción son debido a los elementos mecánicos rodantes y las pérdidas de rozamiento vienen dadas por el ventilador del motor.

Las pérdidas misceláneas son pérdidas que no se ubican en ninguno de los otros tipos y se las pueden estimar como el 1% de la plena carga según Chapman.

Para el cálculo de la eficiencia existen estándares como son: IEC 60034-2-1 (Unión Europea), IEEE 112 (Estados Unidos) y JEC 37 (Japón). Dentro de cada estándar se pueden usar métodos directos e indirectos con sus respectivos análisis de pérdidas.

2.6.1. Normativa IEC 60034-2-1

Esta normativa europea define los diferentes métodos que se pueden utilizar para el cálculo de eficiencia. En la Tabla 4. Se observan los requerimientos que se necesita para determinar la eficiencia con respecto al método que se emplee.

MÉTODOS	NECESIDAD BÁSICA
Métodos directos:	
Medida directa del par	Freno y medidor de par hasta plena carga
Máquina calibrada	Otra máquina completamente calibrada
Back-to-back, doble alimentación	Dos máquinas idénticas
Métodos de las pérdidas totales:	
Método calorimétrico	Envoltura térmica específica
Back-to-back, simple alimentación	Dos máquinas idénticas de rotor bobinado
Suma de pérdidas, con medida del par:	
Pérdidas adicionales en carga a partir de la separación de pérdidas	Freno y medidor de par hasta un 25% superior a plena carga
Suma de pérdidas, sin medida del par:	
Pérdidas adicionales en carga asignadas	Medidor de potencias
Rotor desmontado y ensayo de rotación inversa	Motor auxiliar, de potencia inferior a 5 veces las pérdidas del motor a ensayar
Eh-Star	Resistencia para una corriente un 50% superior a la de plena carga
Circuito equivalente	Sistema de bloqueo del rotor

Tabla 4. Métodos para determinar la eficiencia según la norma IEC 60034-2-1. [5]

2.6.2. Normativa IEC 60034-30

Esta normativa se aplica a motores de inducción de tipo jaula de ardilla con las siguientes características:

- Una sola velocidad y con frecuencia de funcionamiento de 50/60 Hz
- 2 a 6 número de polos
- Tensión nominal de alimentación de hasta 1000 V
- Motores con potencias nominales entre 0,75 – 375 kW
- Servicio S1 o servicio continuo de funcionamiento

Además, la normativa define 4 tipos de eficiencias, determinadas conforme a la normativa IEC 60034-2-1 y se las conoce como IE (International Efficiency):

IE1: Eficiencia estándar

IE2: Alta eficiencia

IE3: Eficiencia premium

IE4: Eficiencia super premium.

En el anexo 1, se observa los valores de la eficiencia de los motores de inducción que deben tener con respecto a su potencia nominal y el número de polos.

La Tabla 5. muestra las principales modificaciones que se han realizado a la normativa.

FECHA	MODIFICACIONES
16/06/2011	La eficiencia de los motores no puede ser inferior a IE2
01/01/2015	La eficiencia de los motores con potencia nominal de 7,5 a 375 kW no puede ser inferior a IE3 o al nivel IE2 operado con un regulador de velocidad
01/07/2017	La eficiencia de los motores con potencia nominal de 0,75 a 375 kW no puede ser inferior a IE3 o al nivel IE2 operado con un regulador de velocidad

Tabla 5. Modificaciones de la normativa IEC 60034-30. [6]

2.6.3. Clases de eficiencia

Además de la normativa europea, existen normas que se rigen en diferentes partes como se observa en la Tabla 6.

	CEMEP	EEUU	IEC 60034-30
Super Premium Efficiency			IE4
Premium Efficiency		NEMA (Premium)	IE3
High Efficiency	EFF1	EPACT	IE2
Standard Efficiency	EFF2		IE1
Below Standar Efficiency	EFF3		

Tabla 6. Clases y equivalencia de eficiencia en motores eléctricos. [6]

El Comité Europeo de Fabricantes de Máquinas Eléctricas y Electrónica de Potencia CEMEP por sus siglas en inglés, el 16 de junio de 2011 dejó de emplear la marca EFF para determinar la clasificación de eficiencia en los motores de inducción y es sustituida por IEC 60034-30.

2.6.4. Modificaciones en la construcción de motores de inducción

Los principales fabricantes de motores conforme a las diferentes normas de sostenibilidad y eficiencia están en constante investigación y desarrollo de materiales y componentes para reducir las pérdidas de potencia al transformar la energía eléctrica en energía mecánica.

Las modificaciones que se realizan para desarrollar motores de alta eficiencia son:

- Chapa magnética: Cambio de material a un acero magnético de bajas pérdidas por histéresis.
- Devanados: Se utiliza más cantidad de cobre en los devanados del estator y mejor calidad del mismo
- Rotor: El rotor se somete a un tratamiento térmico
- Entrehierro: Menor airgap
- Ventilación: Mejoras en el ventilador reduciendo el rozamiento con el aire

2.7. Fallos en los motores de inducción

Los motores de inducción son muy fiables debido a la robustez y fácil uso. Son las máquinas eléctricas rotativas más utilizadas en diferentes sectores, abarcando diversos tipos de aplicaciones.

Muchas veces los motores son sometidos a operar en servicios para los que no fueron fabricados o bien a trabajar sobre sus valores límite, exponiéndose a diferentes tipos de fatiga, desgaste, vibraciones... y, por muy fiables que sean este tipo de motores, pueden

dañarse. Por esta razón se debe llevar un plan de mantenimiento adecuado aplicando, a ser posible, técnicas que permitan detectar diferentes tipos de fallos cuando estos se están fraguando en la máquina. Como ejemplo, el correcto nivelado en la instalación de los motores eléctricos evita la aparición de: excentricidades, vibraciones, ruidos, esfuerzos anormales sobre los rodamientos y ejes.

Existen diferentes tipos de fallos que pueden presentar los motores, a continuación, se detallan los más comunes.

2.7.1. Fallos mecánicos

Este tipo de fallos se dan en los elementos mecánicos del motor como son los cojinetes y rodamientos. La presencia de desequilibrios y desalineaciones en un sistema mecánico afecta el funcionamiento óptimo de los motores eléctricos.

2.7.1.1. Fallos en rodamientos

Los fallos en rodamientos son los más comunes en los motores eléctricos. Existen un conjunto de causas que pueden afectar a la vida esperada de estos componentes, contribuyendo a su deterioro, a saber: deficiente montaje, carga excesiva, fatiga, desgaste, corrosión, lubricación insuficiente o excesiva, contaminación externa, deformaciones elásticas y térmicas, vibraciones externas cuando la máquina se encuentra apagada, paso de corrientes.

En la Figura 6. se puede observar el desprendimiento de la jaula del rodamiento, este tipo de fallo se da por diversos factores como se mencionó en el párrafo anterior.



Figura 6. Rodamiento con fallo

2.7.1.2. Rotor desequilibrado

La construcción de un motor perfectamente equilibrado resulta complicada, debido a que la distribución de la masa del rotor tendría que estar uniformemente distribuida. Sin embargo, el desequilibrio presente tras la fabricación es normalmente mínimo.

Existen diversos factores que pueden causar desequilibrio en los rotores de motores de inducción: desgastes y rozamiento de ejes, corrosión química, depósitos de material, deformaciones del rotor por altas temperaturas (dilataciones) en puntos específicos.

El nivel de vibraciones a las que están sometidos los sistemas mecánicos giratorios está ligado con el nivel de desequilibrio que presentan las máquinas.

Los tipos de desequilibrios que se pueden dar en las máquinas son:

- Desequilibrio estático: el centro de gravedad del rotor está desplazado del eje de rotación como se observa en la Figura 7.

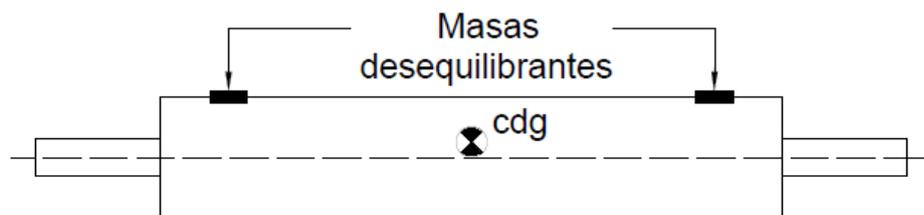


Figura 7. Desequilibrio estático

- Desequilibrio dinámico: El eje de rotación de la máquina no es el mismo que el eje de inercia del rotor como se observa en la Figura 8.

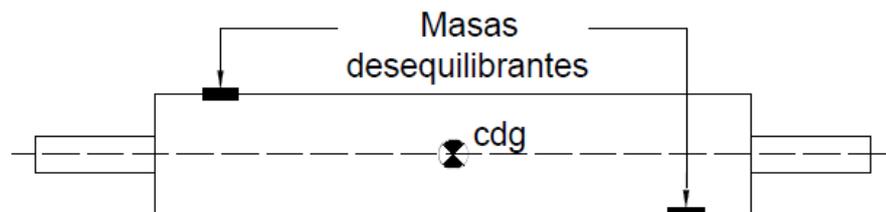


Figura 8. Desequilibrio dinámico

2.7.1.3. Desalineación de ejes

En la mayoría de aplicaciones industriales los motores eléctricos son empleados para accionar diversas máquinas rotativas. El acoplamiento entre las máquinas se realiza a través de un sistema rígido o flexible, según sea la aplicación y en ambos casos se tiene que conseguir que los ejes de las máquinas sean perfectamente colineales, esto determina una correcta alineación. En la Figura 9 puede apreciar una desalineación en los ejes de las máquinas.

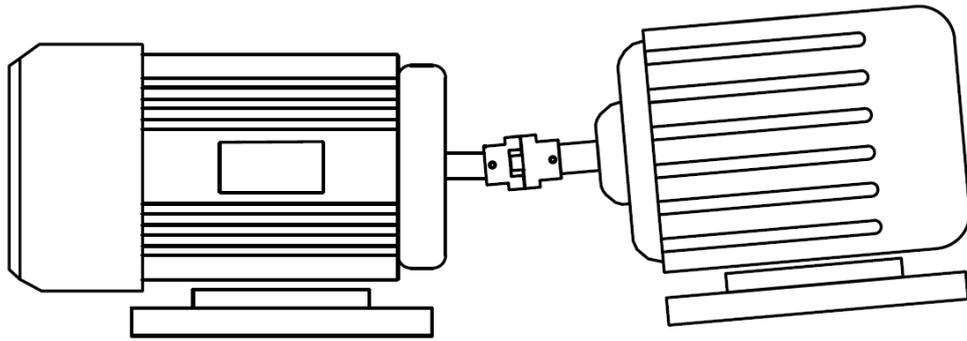


Figura 9. Desalineación de ejes en acoples de máquinas

Las desalineaciones en las máquinas (motores de inducción) generan excentricidades que acaban provocando esfuerzos asimétricos en rodamientos, vibraciones excesivas e incluso puede producir rozaduras entre rotor y estator. En el apartado de asimetrías rotóricas, se aborda el tema de fallos por excentricidades.

2.7.2. Asimetrías rotóricas

Las asimetrías rotóricas se dan cuando las barras y/o anillos de cortocircuito que conforman la jaula de ardilla se fisuran o rompen. Otra posible asimetría se da cuando existen excentricidades en el entrehierro (esto es, cuando el entrehierro no es uniforme).

2.7.2.1. Rotura de barras rotóricas

Las barras del rotor están sometidas a importantes esfuerzos electrodinámicos debido a las elevadas corrientes que pueden circular por ellas. Este fenómeno se acrecienta durante ciertos transitorios, como el arranque. Durante el transitorio de arranque, las barras sufren gradientes térmicos importantes, y se acrecientan los esfuerzos y la fatiga, principalmente en las uniones entre las barras y los anillos de cortocircuito. Eso puede conllevar la aparición de micro grietas por las que puede progresar la rotura completa de barra. El fenómeno se agrava en el caso de arranques frecuentes y pesados (con elevada inercia), ya que se puede probar que el calor disipado en la jaula es función de la inercia a mover contribuyendo así a que los fenómenos antes citados se hagan más severos.

Fallos en la jaula pueden ser provocados por problemas de porosidad durante la fabricación en rotores con barras de aluminio.

Usualmente, el problema es más frecuente en rotores con barras de cobre y es más probable en el punto de unión entre la barra y anillo. Este punto se ilustra en la Figura 10 para un motor con barras de aluminio.

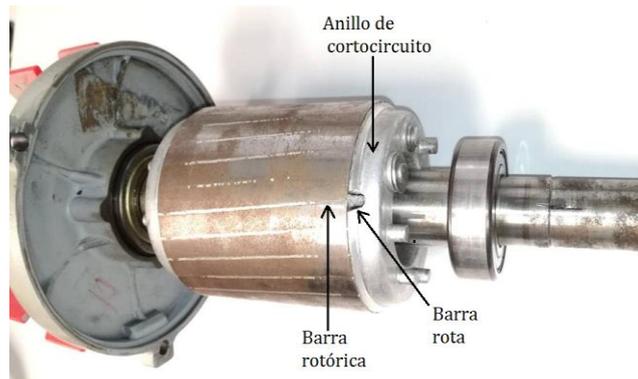


Figura 10. Ensayo destructivo de rotura de barras rotóricas

2.7.2.2. Rotura de anillos rotóricos

Los anillos rotóricos al igual que las barras pueden tener fallos similares a los mencionadas en el apartado anterior.

2.7.2.3. Excentricidades

Como se mencionó en el apartado de eficiencia, una de las modificaciones que realizan los fabricantes de motores es: reducir el tamaño del entrehierro para mejorar la eficiencia de los motores. Dependiendo de la potencia del motor, el tamaño del entrehierro puede ser menor a 1 mm.

Con el entrehierro de los motores sumamente pequeño, fácilmente se puede tener una ligera desviación en el eje, esto es, puede que la anchura de entrehierro no sea uniforme en todo el perímetro del rotor, provocando un desequilibrio en el campo magnético giratorio.

Fenómenos bastante usuales, tales como el desgaste de los cojinetes y la presencia de niveles elevados de vibraciones incrementan la posibilidad de que un entrehierro no uniforme produzca daños en los núcleos magnéticos rotóricos y estáticos debido a posibles contactos [7]. En la Figura 11. se observa desgastes en el núcleo rotórico debido a excentricidades.



Figura 11. Rozamiento del rotor con el estator debido a excentricidades [8]

Las excentricidades se las puede clasificar de la siguiente manera:

- Excentricidad Estática: La posición del mínimo entrehierro permanece fija en el espacio, la distancia del entrehierro no es homogéneo. Ver Figura 12.

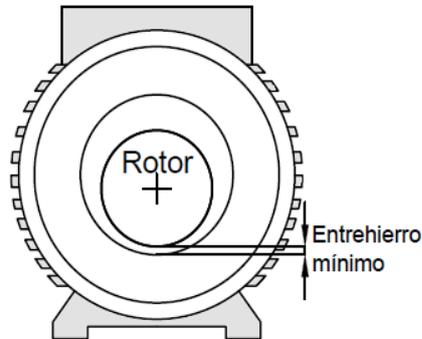


Figura 12. Excentricidad estática

- Excentricidad Dinámica: La posición del entrehierro gira de forma solidaria con el rotor; para cada posición del rotor el tamaño del entrehierro siempre mide lo mismo. Ver figura 13.

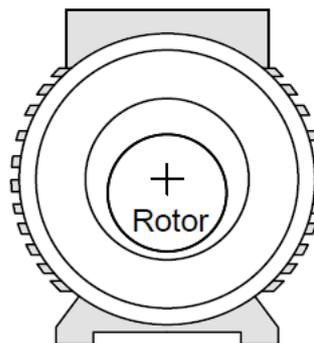


Figura 13. Excentricidad dinámica

- Excentricidad Mixta: La posición del mínimo entrehierro gira de forma solidaria con el rotor, el eje de giro del rotor no coincide con el eje del estator; para cada posición del rotor el tamaño del entrehierro es diferente. Ver Figura 14.

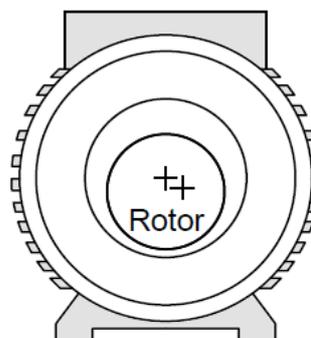


Figura 14. Excentricidad mixta

2.7.3. Defectos en el sistema aislante

El fallo en el sistema aislante del motor es uno de los más frecuentes. Además, sus consecuencias son normalmente catastróficas y las reparaciones costosas. La mayor parte de fallos en el aislamiento de los motores eléctricos están asociados a sobrecargas térmicas que son producidas por diferentes factores como: variaciones en la tensión de alimentación, desequilibrio de tensión entre fases, arranques múltiples, sobrecargas, mala ventilación, incremento de la temperatura ambiente, puntos calientes...

Existen otras condiciones que provocan fallos en el material aislante como son efectos eléctricos (descargas parciales, sobretensiones), mecánicos (impactos, vibraciones excesivas) o ambientales (presencia de suciedad, humedad...).

Una degradación excesiva del aislamiento puede conducir a fallos como cortocircuitos entre espiras o bobinas cuya propagación es usualmente muy rápida y cuyas consecuencias son muy negativas.

En la Figura 15. se puede observar un fallo común en los motores como es el sobrecalentamiento del aislamiento.



Figura 15. Fallo en el sistema de aislamiento

2.7.4. Fallos en el paquete magnético

Como se mencionó anteriormente en la construcción de los motores, el estator está formado por capas de acero al silicio aisladas entre sí. Cuando los motores trabajan con sobrecargas o con algún otro fallo de tipo mecánico el aislante de las capas de acero del estator se puede ver afectado, perdiendo las características principales del material aislante. Esto genera que haya un flujo de corrientes entre las láminas del paquete magnético generando calor, pudiendo afectar el aislamiento del devanado trifásico.

Este tipo de falla puede darse también de fábrica en la manipulación de las capas de acero para la construcción del estator o a su vez en presencia de cuerpos extraños dentro del motor que degeneren el aislamiento.

3. METODOLOGÍA

Como se mencionó en el capítulo anterior, la eficiencia (rendimiento) de un motor se define como la relación entre la potencia mecánica proporcionada por el motor y la potencia eléctrica demandada de la red. La eficiencia de los motores se la puede conocer utilizando el método directo que consiste en medir la potencia eléctrica y la potencia mecánica directamente.

En el mercado existen diferentes dispositivos que permiten medir la potencia eléctrica P_e , como analizadores de energía. En cambio, la potencia mecánica P_m no resulta tan sencilla de determinar. En condiciones de laboratorio, como en el presente trabajo, se la puede determinar utilizando un dispositivo para medir el torque T que entrega el eje del motor (torquímetro) y otro dispositivo para medir la velocidad angular ω (tacómetro), sabiendo que la potencia mecánica viene dada por la Ecuación 3.

$$P_m = T * \omega \quad \text{Ecuación 3}$$

El presente trabajo se desarrolla en los laboratorios del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica de Valencia. A continuación, se detallarán los equipos que se van a emplear y el procedimiento que se realizará en cada ensayo.

3.1. Caracterización de los equipos

El laboratorio en el que se realiza el proyecto cuenta con una bancada en donde se encuentra un motor de inducción tipo jaula de ardilla acoplada con una máquina DC, a través de un transductor de torque como se observa en la Figura 16.



Figura 16. Bancada utilizada para realizar los diferentes ensayos

En la Tabla 7 se especifican las características del motor de inducción de marca Siemens que se va a utilizar.

Modelo	1LA2080-4AA10
Potencia mecánica nominal	1,1 kW
Velocidad nominal	1410 rpm
Voltaje nominal	400(Y)/230 (Δ)
Corriente nominal	2.7(Y)/4.6 (Δ)
Factor de potencia ($\cos\varphi$)	0,8
Número de barras rotóricas	28

Tabla 7. Características del motor de inducción a ensayar

Con estos valores y empleando la ecuación 4, se puede calcular la potencia eléctrica demandada por el motor en condiciones nominales:

$$P_e = \sqrt{3} * V_L * I_L * \cos\varphi \quad \text{Ecuación 4}$$

$$P_e = \sqrt{3} * 400 * 2,7 * 0,8$$

$$P_e = 1496,49 \text{ W}$$

Aplicando la Ecuación 1, se puede conocer la eficiencia del motor en condiciones nominales:

$$\eta = \frac{1100}{1496,49} * 100\%$$

$$\eta = 73,51 \%$$

La máquina DC de la marca BKB, se utiliza como generador de excitación externa y tiene las siguientes características (ver Tabla 8):

Modelo	49962/3
Tipo	SEPEX
Potencia (kW)	3
Corriente (A)	13,6
Velocidad (rpm)	2000/3000
Voltaje	220
Clase de Aislamiento	E

Tabla 8. Características de la máquina DC

El transductor de torque permite realizar medidas de hasta 100nm de par, tiene una sensibilidad de 2mV/V, una tolerancia < 0.2%; en la Figura 17 se muestra el transductor con sus respectivos acoples flexibles de goma.



Figura 17. Transductor de torque

El transductor de torque cuenta con un indicador; el voltaje nominal de excitación tanto del transductor y del indicador es de 20 VDC. En la Figura 18 se puede apreciar el indicador y la fuente de alimentación.



Figura 18. Indicador de torque y fuente de alimentación

Para conocer la velocidad de giro del motor se utiliza un tacómetro de la marca HIBOK como se observa en la Figura 19. Éste indica la velocidad de giro en revoluciones por minuto.



Figura 19. Tacómetro digital HIBOK 23

Un analizador de redes eléctricas permite conocer la tensión, frecuencia, corriente, potencia eléctrica y factor de potencia, entre otras. El laboratorio cuenta con un tablero de fácil conexión con el analizador de marca CIRCUTOR como se observa en la Figura 20.



Figura 20. Analizador de redes eléctricas

En la Tabla 9. se observan las características del analizador de redes eléctricas:

Circuito de medida	
Tensión nominal	300 V c.a (f-n)/520 V c.a (f-n)
Frecuencia	45...65 Hz
Corriente nominal	5 A.
Sobrecarga permanente	1,2 corriente nominal
Clase precisión	
Tensión	0,5 % +-2 dígitos
Corriente	0,5 % +-2 dígitos
Potencias	1 % +-2 dígitos

Tabla 9. Características del analizador de redes eléctricas. [9]

Una fuente externa variable de voltaje DC de 0 a 200 VDC alimenta la excitación externa del generador, el cual modifica la corriente de campo. De esta manera se puede variar el nivel de carga del motor de inducción. La fuente cuenta con un autotransformador para regular la tensión aplicada, como se observa en la Figura 21.



Figura 21. Fuente de voltaje externa de DC

3.2. Procedimiento

El procedimiento que se va a emplear para los diferentes ensayos es el siguiente:

1. Se alimenta el analizador con una fuente trifásica.
2. Los terminales de salida del analizador alimentan a un magnetotérmico (Pequeño Interruptor Automático) que sirve para realizar las maniobras de arranque y paro.
3. El motor es conectado a la salida del magnetotérmico.
4. El indicador de torque es alimentado por una fuente de voltaje continuo.
5. Se conecta una fuente externa variable de voltaje continuo a la excitación de la máquina DC, que trabaja como generador. Esta fuente es la encargada de modificar la corriente de campo para tener los diferentes niveles de carga del motor de inducción.
6. Se conecta un banco de resistencias a los devanados del inducido de la máquina DC para disipar la potencia generada por dicha máquina.
7. Con todos los elementos y dispositivos conectados, se procede a poner a cero el indicador de torque para evitar información errónea.
8. Se arranca el motor de inducción.
9. Se enciende la fuente externa de voltaje en continua y se excita con 185 VDC inicialmente, que es un valor estimado para que el motor opere con el 100% de su nivel de carga.
10. Se proceden a la toma de información (potencia eléctrica, torque, velocidad, corrientes)
11. Para tener información con diferentes niveles de carga del motor y con ayuda de un voltímetro, se modifica gradualmente el voltaje de la excitación.

En la Figura 22 se puede observar una representación de la conexión de todos los elementos utilizados.

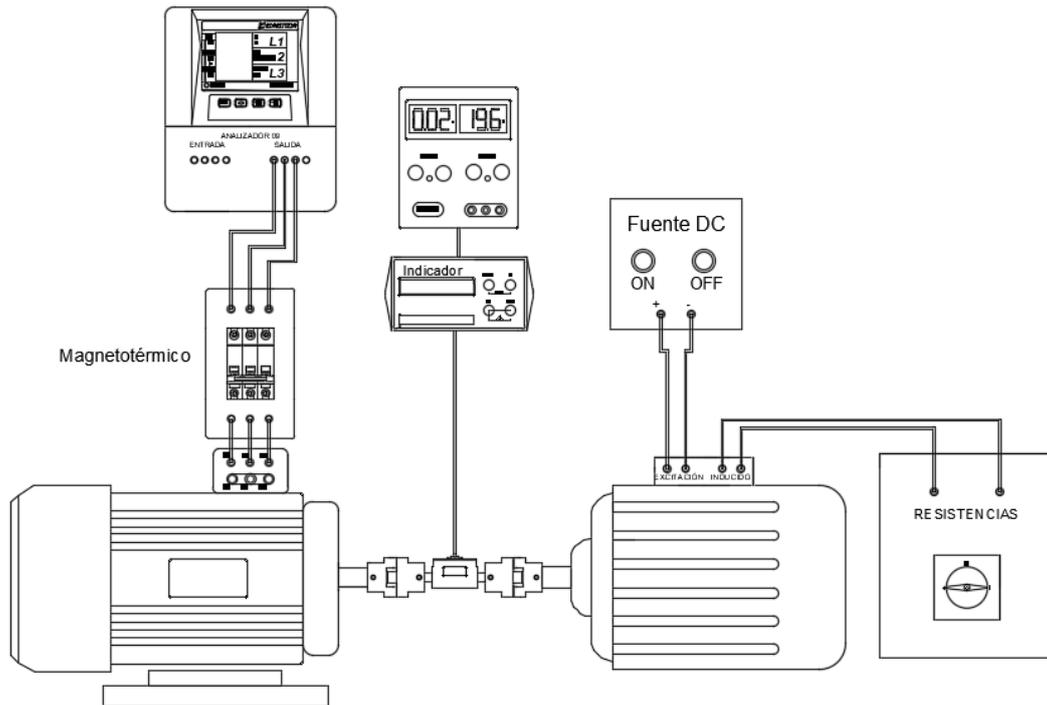


Figura 22. Representación de las conexiones para los ensayos

3.2.1. Fallos en el rotor

El laboratorio cuenta con motores en los cuales se han realizado ensayos destructivos para generar fallos rotóricos de la manera más fiel posible, tomando en cuenta todas las características propias de este tipo de fallo, en donde el punto más frágil de rotura es en la unión de las barras rotóricas con el anillo de cortocircuito.

Para este tipo de fallo se realizará un ensayo con un rotor con nueve barras rotóricas rotas consecutivas como se observa en la Figura 23.

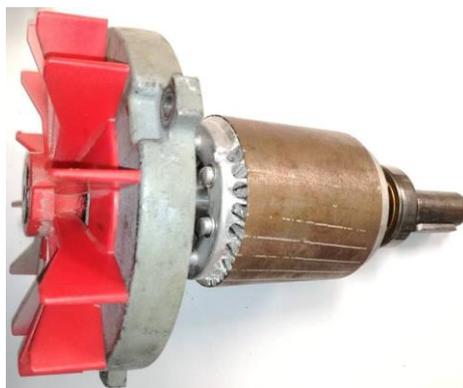


Figura 23. Rotor con 9 barras rotas consecutivas

Este nivel de severidad de fallo puede parecer excesivo. Sin embargo, se han encontrado motores reales operando durante largo tiempo con un porcentaje similar de barras rotas en la jaula, sin que hubiera devenido un fallo catastrófico.

3.2.2. Asimetrías en el devanado del estator

Uno de los fallos que más se encuentran a nivel general en el ámbito eléctrico se deben a que el par de apriete en las conexiones eléctricas no es el óptimo, o a su vez se pueden aflojar. Cuando existen conexiones eléctricas flojas se genera una alta resistencia y su temperatura se empieza a elevar y, en casos, pueden llegar a abrir el circuito.

Estas conexiones de alta resistencia pueden también ser provocadas por otras causas como deterioro de los contactos de la aparatamiento eléctrica (contactores, interruptores automáticos), fusión parcial del elemento conductor en fusibles, fallos en conexiones entre bobinas de cada fase...

Este ensayo pretende simular este tipo de fallo, para lo cual se va a generar una asimetría en un devanado del estator con ayuda de un reóstato. El valor resistivo de cada uno de los devanados estatóricos es de 8.5Ω .

Se realizarán 4 ensayos, cada uno con diferente valor de resistencia del reóstato. En la Figura 24 se observa el diagrama de conexión añadiendo el reóstato y conectando en serie a un devanado del motor

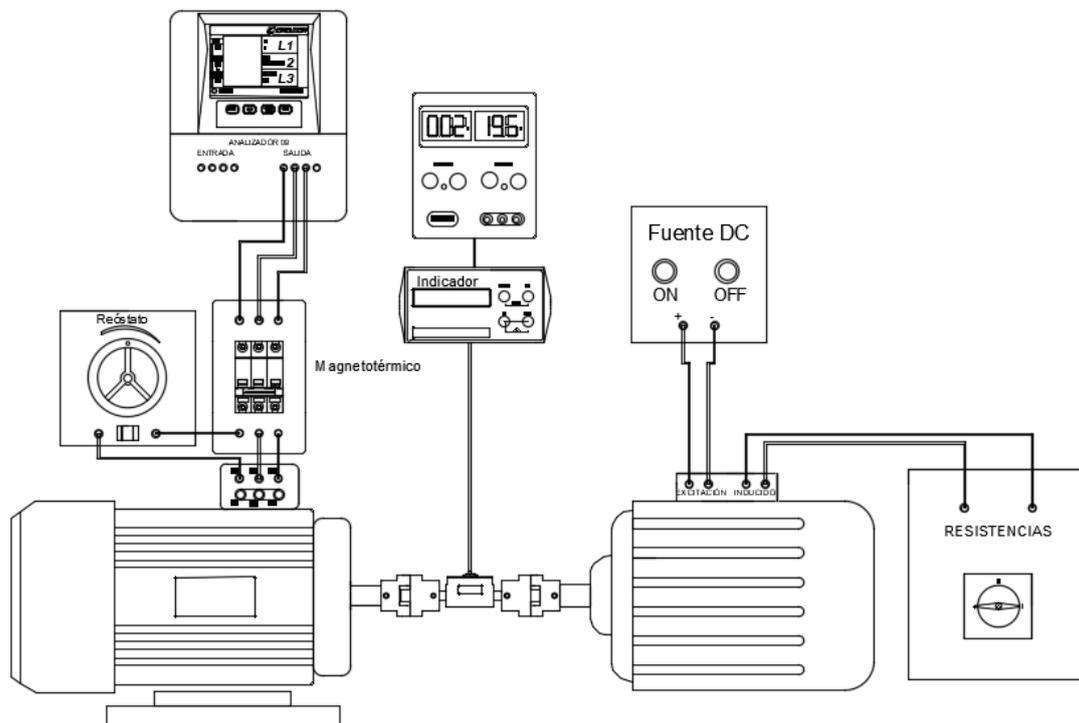


Figura 24. Representación de las conexiones realizadas para generar asimetrías en el devanado del estator

El valor óhmico del reóstato para cada ensayo es:

$$R_1=0.08 \Omega, \quad R_2= 2 \Omega, \quad R_3=3 \Omega, \quad R_4=4,5.$$

3.2.3. Excentricidad/desalineamientos

Como se mencionó en el capítulo anterior una desalineación causa efectos similares a una excentricidad en el entrehierro. Se realizarán dos ensayos en donde se generará una desalineación horizontal (Ver Figura 25) y otro con desalineación vertical (Ver Figura 26).



Figura 25. Desalineamiento horizontal del motor



Figura 26. Desalineamiento vertical del motor

Otro problema muy común a nivel industrial se da a causa de aflojamientos en los pernos de anclaje del motor y que produce excentricidades en el entrehierro. Se pretende reflejar este tipo de fallo, en donde el motor va a funcionar con un único perno de anclaje como se observa en la Figura 27.



Figura 27. Excentricidad debido a incorrecta sujeción de la base del motor

3.2.4. Sistema de ventilación

El objetivo de este ensayo es tratar de replicar el principal fallo en el sistema de ventilación que se da por problemas de suciedad y acumulación de polvo. La Figura 28 muestra cómo se va a obstruir la entrada de aire del sistema de ventilación.



Figura 28. Fallo en el sistema de ventilación del motor

3.2.5. Sistema de aislamiento

El laboratorio cuenta con estatores con fallos en el aislamiento, el primer ensayo que se va a realizar es con un estator con sobrecalentamiento en 2 fases, como se observa en la Figura 29.



Figura 29. Fallo en el sistema de aislamiento en 2 fases

Para conocer aún más a fondo la evolución de la eficiencia en los motores con fallos en aislamiento, se realizan dos ensayos destructivos para sobrecalentar el aislamiento. En la Figura 30 se puede observar el estator completamente sobrecalentado.



Figura 30. Fallo en el sistema de aislamiento por sobrecalentamiento

4. RESULTADOS

La información obtenida de los diferentes ensayos se agrupó en tablas. Se realizaron también gráficas en las que se observa la diferencia entre la eficiencia de un motor sano con un motor con fallos.

En la Tabla 10 se observan los valores medidos del motor sano. Esta tabla servirá de referencia para realizar las respectivas comparaciones en los distintos casos de fallo.

Voltaje DC (Excitación)	Velocidad (rpm)	Par (N.m)	P.e. por fase	P.e. (kW)	P.m. (W)	Corriente de fase	Eficiencia (%)	Carga (%)
185	1414	7,9	0,512	1,541	1169,78	2,805	75,91	106,34
			0,511			2,794		
			0,518			2,813		
167	1419	7,34	0,476	1,433	1090,70	2,663	76,11	99,15
			0,476			2,657		
			0,481			2,669		
149	1426	6,73	0,436	1,311	1004,99	2,5	76,66	91,36
			0,434			2,492		
			0,441			2,512		
131	1434	6,04	0,391	1,178	907,02	2,342	77,00	82,46
			0,391			2,327		
			0,396			2,345		
113	1443	5,28	0,345	1,039	797,86	2,175	76,79	72,53
			0,344			2,167		
			0,35			2,179		
95	1453	4,44	0,294	0,887	675,58	2,016	76,16	61,42
			0,293			2,001		
			0,3			2,024		
77	1462	3,55	0,241	0,729	543,51	1,872	74,56	49,41
			0,241			1,855		
			0,247			1,88		
59	1473	2,63	0,19	0,574	405,68	1,767	70,68	36,88
			0,188			1,746		
			0,196			1,766		
41	1482	1,77	0,143	0,432	274,69	1,701	63,59	24,97
			0,141			1,685		
			0,148			1,695		
23	1486	1,11	0,108	0,328	172,73	1,67	52,66	15,70
			0,107			1,656		
			0,113			1,656		
0	1493	0,56	0,082	0,253	87,55	1,664	34,61	7,96
			0,082			1,645		
			0,089			1,645		

Tabla 10. Valores del ensayo realizado en el motor sano

En la Figura 31 se puede observar la representación gráfica de la evolución de la eficiencia del motor sano respecto al nivel de carga.

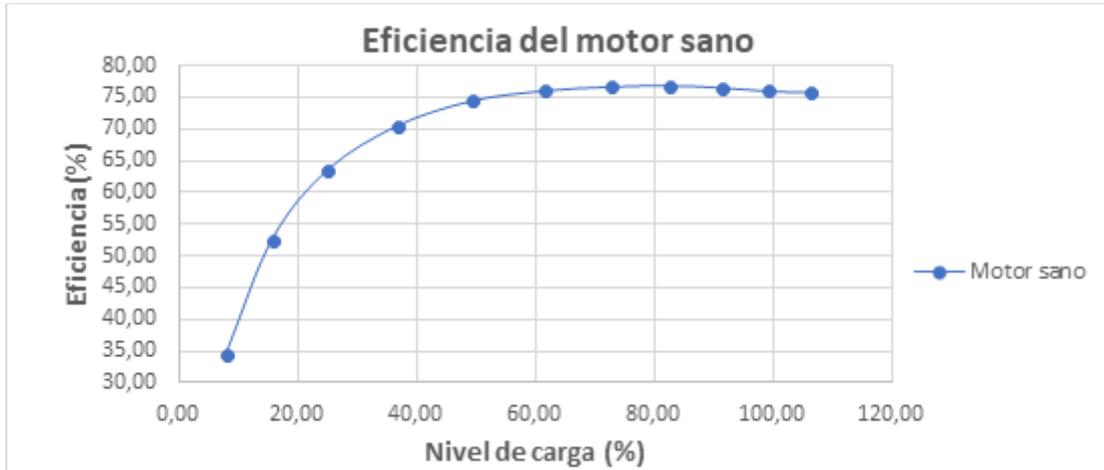


Figura 31. Eficiencia vs Nivel de carga del motor sano

Con la información de la placa de características del motor y aplicando los cálculos matemáticos se conoció que la eficiencia del motor en condiciones nominales es de $\eta = 73,51 \%$; en la práctica, se observa que, en las condiciones de operación del motor ensayado, la eficiencia medida en condiciones nominales es aún mayor teniendo un valor de $\eta = 76,11 \%$ al 99,15% de la carga.

4.1. Evaluación de la eficiencia con fallos en el rotor

La Tabla 11 muestra los resultados obtenidos del ensayo realizado con un rotor con 9 barras rotas consecutivas de un total de 28.

Voltaje DC (Excitación)	Velocidad (rpm)	Par (N.m)	P.e. por fase	P.e. (kW)	P.m. (kW)	Corriente de fase	Eficiencia (%)	Carga (%)
185	1329	7,63	0,553	1,665	1061,89	3,501	63,77697	96,535
			0,553			3,507		
			0,559			3,526		
168	1342	7,15	0,514	1,552	1004,82	3,314	64,74339	91,347
			0,516			3,312		
			0,522			3,333		
151	1358	6,67	0,479	1,441	948,537	3,115	65,82491	86,231
			0,479			3,143		
			0,483			3,15		
134	1383	5,82	0,412	1,248	842,896	2,834	67,53971	76,627
			0,417			2,85		
			0,419			2,862		
117	1398	5,3	0,374	1,133	775,911	2,671	68,48284	70,537
			0,378			2,678		
			0,381			2,697		
100	1414	4,62	0,327	0,989	684,101	2,474	69,17095	62,191
			0,331			2,478		
			0,331			2,5		
83	1433	3,85	0,278	0,841	577,744	2,278	68,69728	52,522
			0,281			2,285		
			0,282			2,293		
66	1450	3	0,224	0,676	455,531	2,083	67,38623	41,412
			0,226			2,087		
			0,226			2,105		
49	1466	2,1	0,172	0,52	322,39	1,913	61,99812	29,308
			0,174			1,918		
			0,174			1,934		
32	1475	1,4	0,131	0,394	216,246	1,825	54,88485	19,659
			0,132			1,829		
			0,131			1,843		
15	1484	0,82	0,098	0,297	127,431	1,783	42,90619	11,585
			0,099			1,779		
			0,1			1,792		
0	1488	0,59	0,086	0,261	91,9356	1,775	35,22436	8,3578
			0,087			1,768		
			0,088			1,785		

Tabla 11. Valores del ensayo realizado con un rotor con 9 barras rotas consecutivas

En la Figura 32 se puede ver la representación gráfica del valor de la eficiencia del motor en estado sano y la del motor con 9 barras rotóricas consecutivas rotas.

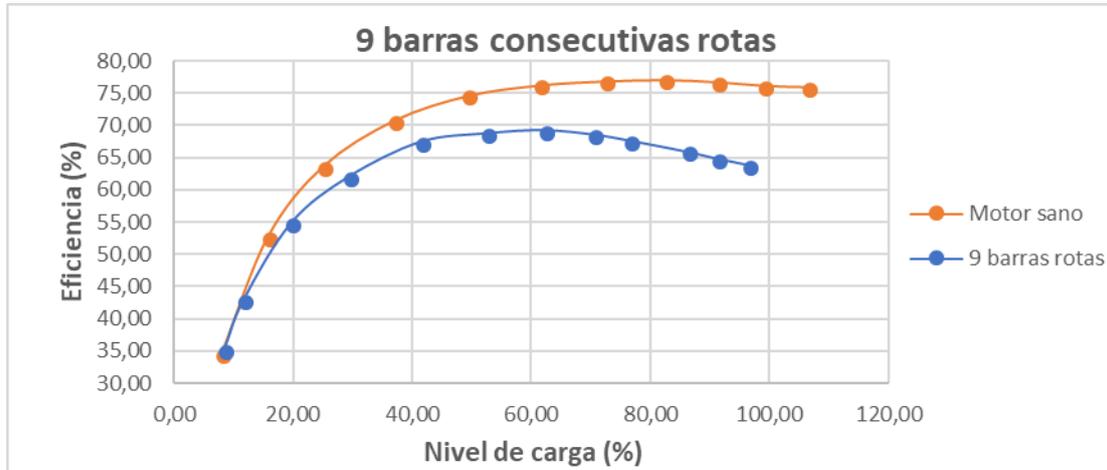


Figura 32. Comparación del desarrollo de la eficiencia de un motor sano con un motor con 9 barras rotas

Al realizar la comparación de este tipo de fallo con el motor sano, la pérdida de eficiencia es evidentemente clara. Como se mencionó en el apartado de metodología, la excitación de la máquina DC se la realizó con 185 VDC y se logró alcanzar un 93,54% de la carga. La eficiencia en ese punto es $\eta = 63,78 \%$, y la eficiencia del motor sano a plena carga es aproximadamente $\eta = 76,11 \%$; esto es, se tiene aproximadamente una reducción de la eficiencia en más del 12% a ese nivel de carga. Otro punto de interés es que el motor aún con este fallo crítico, su funcionamiento aparentemente era normal. Como se ha comentado, condiciones similares de severidad de fallo en el rotor se han dado en motores reales, sin que hubiera devenido fallo catastrófico. Es de resaltar pues como el fallo repercute severamente en términos de reducción de eficiencia, aunque no provoque la parada del motor, sin que el usuario sea muchas veces consciente de ello.

4.2. Evaluación de la eficiencia con fallos asimétricos en el devanado del estator

La Tabla 12 muestra los resultados el ensayo realizado con el primer nivel de asimetría en el devanado del estator.

Voltaje DC (Excitación)	Velocidad (rpm)	Par (N.m)	P.e. por fase	P.e. (kW)	P.m. (W)	Corriente de fase	Eficiencia (%)	Carga (%)
185	1407	8,05	0,521	1,574	1186,09	2,824	75,36	107,83
			0,526			2,842		
			0,527			2,855		
167	1412	7,23	0,466	1,413	1069,06	2,589	75,66	97,19
			0,474			2,61		
			0,473			2,621		
149	1422	6,54	0,421	1,278	973,881	2,419	76,20	88,53
			0,427			2,432		
			0,43			2,449		
131	1431	5,91	0,378	1,155	885,637	2,259	76,68	80,51
			0,388			2,286		
			0,389			2,313		
113	1444	5,14	0,332	1,014	777,247	2,103	76,65	70,66
			0,342			2,135		
			0,34			2,151		
95	1455	4,29	0,281	0,865	653,655	1,95	75,57	59,42
			0,294			1,994		
			0,29			2,01		
77	1466	3,34	0,229	0,706	512,754	1,827	72,63	46,61
			0,242			1,865		
			0,235			1,881		
59	1475	2,48	0,179	0,558	383,065	1,731	68,65	34,82
			0,192			1,778		
			0,187			1,789		
41	1482	1,66	0,135	0,426	257,623	1,678	60,47	23,42
			0,149			1,72		
			0,142			1,733		
23	1486	1,16	0,111	0,353	180,512	1,627	51,14	16,41
			0,127			1,686		
			0,115			1,701		
0	1492	0,58	0,079	0,256	90,6203	1,642	35,40	8,24
			0,093			1,679		
			0,084			1,707		

Tabla 12. Valores del ensayo realizado con el primer nivel de asimetría en el devanado

En la Figura 33 se puede ver la representación gráfica del valor de la eficiencia del motor en estado sano y la del motor con el primer nivel de asimetría en el devanado del estator.

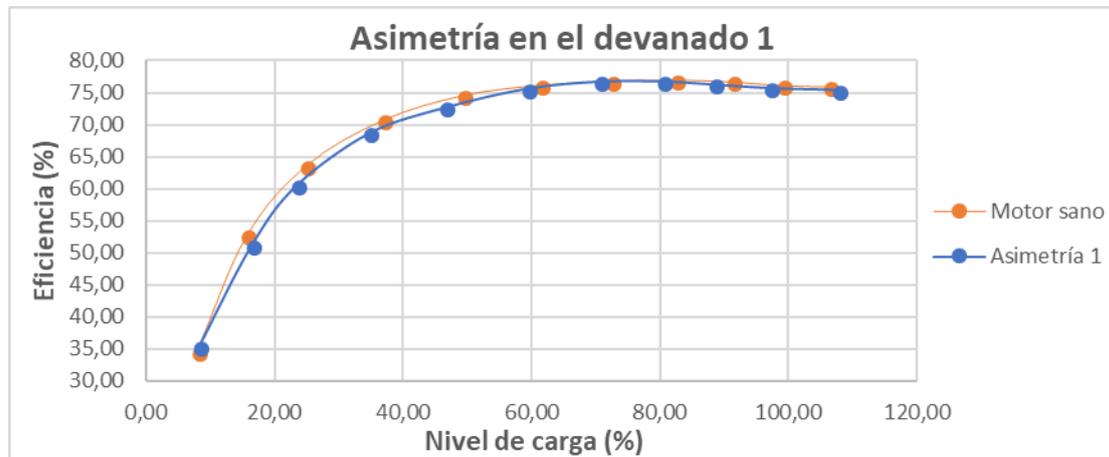


Figura 33. Comparación del desarrollo de la eficiencia de un motor sano con un motor con el primer nivel de asimetría en el devanado

Al analizar la evolución de la eficiencia con este fallo, se nota que la curva de la eficiencia es muy similar a la del motor sano, ya que el nivel de asimetría es reducido (del 0,94% del valor óhmico de la resistividad del devanado).

La Tabla 13 muestra los resultados del ensayo realizado con el segundo nivel de asimetría en el devanado del estator.

Voltaje DC (Excitación)	Velocidad (rpm)	Par (N.m)	P.e. por fase	P.e. (kW)	P.m. (W)	Corriente de fase	Eficiencia (%)	Carga (%)
185	1405	8	0,512	1,578	1177,05	2,827	74,59	107,00
			0,52			2,781		
			0,546			2,92		
167	1412	7,25	0,463	1,428	1072,02	2,597	75,07	97,46
			0,473			2,567		
			0,492			2,687		
149	1422	6,53	0,415	1,283	972,39	2,412	75,79	88,40
			0,424			2,379		
			0,444			2,499		
131	1430	5,91	0,373	1,162	885,02	2,26	76,16	80,46
			0,385			2,233		
			0,404			2,357		
113	1443	5,14	0,327	1,021	776,71	2,1	76,07	70,61
			0,342			2,085		
			0,352			2,197		
95	1453	4,31	0,274	0,871	655,80	1,948	75,29	59,62
			0,295			1,952		
			0,302			2,057		
77	1465	3,34	0,22	0,705	512,40	1,821	72,68	46,58
			0,24			1,812		
			0,245			1,912		
59	1475	2,48	0,171	0,561	383,06	1,721	68,28	34,82
			0,195			1,73		
			0,195			1,828		
41	1482	1,66	0,127	0,429	257,62	1,669	60,05	23,42
			0,152			1,677		
			0,15			1,77		
23	1486	1,18	0,102	0,353	183,62	1,62	52,02	16,69
			0,13			1,624		
			0,121			1,735		
0	1492	0,58	0,07	0,258	90,62	1,636	35,12	8,24
			0,098			1,637		
			0,09			1,74		

Tabla 13. Valores del ensayo realizado con el segundo nivel de asimetría en el devanado

En la Figura 34 se puede ver la representación gráfica del valor de la eficiencia del motor en estado sano y la del motor con el segundo nivel de asimetría en el devanado del estator.

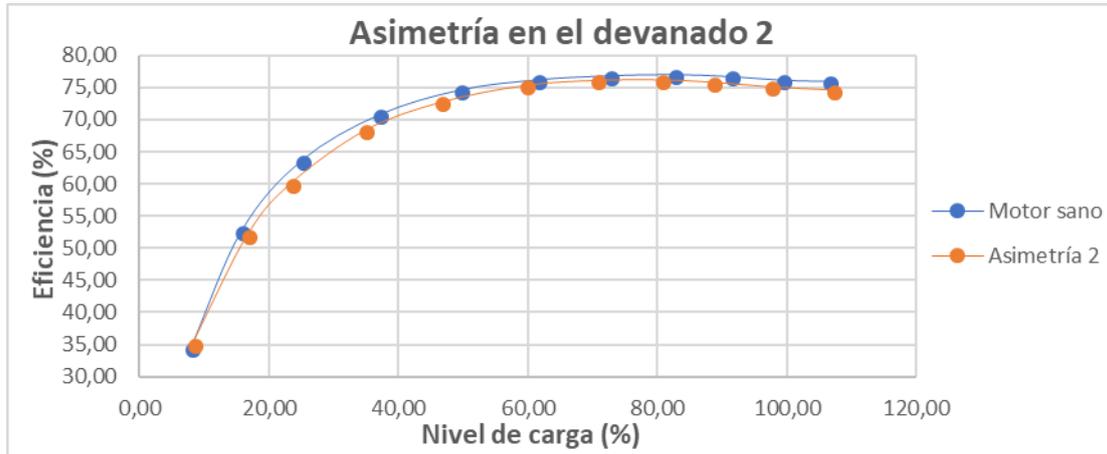


Figura 34. Comparación del desarrollo de la eficiencia de un motor sano con un motor con el segundo nivel de asimetría en el devanado

En este ensayo, el nivel de asimetría en el devanado fue de un 23,53% del valor óhmico, y se puede apreciar una ligera reducción en la eficiencia.

El valor de la eficiencia con este fallo es de $\eta = 75,07\%$ al 97,46% de carga, que comparándolo con el motor sano pierde un poco más del 1%.

La Tabla 14 muestra los resultados del ensayo realizado con el tercer nivel de asimetría en el devanado del estator.

Voltaje DC (Excitación)	Velocidad (rpm)	Par (N.m)	P.e. por fase	P.e. (kW)	P.m. (W)	Corriente de fase	Eficiencia (%)	Carga (%)
185	1404	7,98	0,509	1,581	1173,27	2,817	74,21	106,66
			0,514			2,717		
			0,558			2,948		
167	1411	7,29	0,462	1,442	1077,17	2,61	74,70	97,92
			0,472			2,54		
			0,508			2,737		
149	1421	6,53	0,409	1,284	971,71	2,41	75,68	88,34
			0,42			2,342		
			0,455			2,539		
131	1430	5,91	0,368	1,166	885,02	2,263	75,90	80,46
			0,384			2,201		
			0,414			2,391		
113	1442	5,14	0,323	1,024	776,17	2,101	75,80	70,56
			0,34			2,054		
			0,361			2,22		
95	1454	4,31	0,269	0,874	656,25	1,948	75,09	59,66
			0,294			1,914		
			0,311			2,085		
77	1465	3,35	0,213	0,709	513,94	1,813	72,49	46,72
			0,24			1,773		
			0,256			1,946		
59	1475	2,48	0,164	0,563	383,06	1,714	68,04	34,82
			0,197			1,695		
			0,202			1,853		
41	1482	1,66	0,121	0,432	257,62	1,66	59,63	23,42
			0,155			1,644		
			0,156			1,8		
23	1485	1,18	0,095	0,353	183,50	1,61	51,98	16,68
			0,132			1,606		
			0,126			1,754		
0	1492	0,58	0,064	0,261	90,62	1,632	34,72	8,24
			0,102			1,61		
			0,095			1,765		

Tabla 14. Valores del ensayo realizado con el tercer nivel de asimetría en el devanado

En la Figura 35 se puede ver la representación gráfica del valor de la eficiencia del motor en estado sano y la del motor con el tercer nivel de asimetría en el devanado del estator.

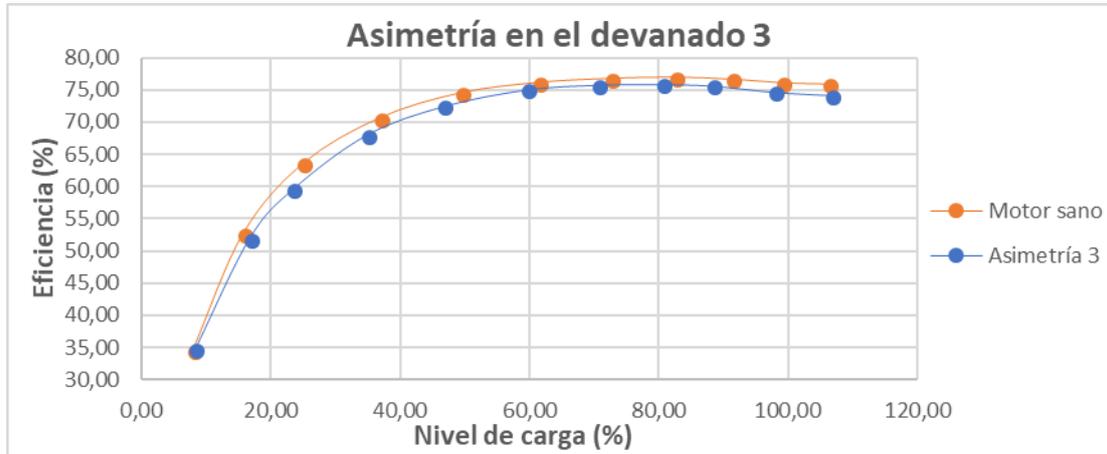


Figura 35. Comparación del desarrollo de la eficiencia de un motor sano con un motor con el tercer nivel de asimetría en el devanado

En este ensayo el nivel de asimetría en el devanado fue de un 35,29% del valor óhmico, en donde, el valor de la eficiencia con este fallo es de $\eta = 74,70\%$ al $97,82\%$, teniendo una reducción del rendimiento aproximadamente de un 1,4% con referencia al motor sano.

La Tabla 15. Muestra los resultados del último ensayo realizado con el cuarto nivel de asimetría en uno de los devanados del estator.

Voltaje DC (Excitación)	Velocidad (rpm)	Par (N.m)	P.e. por fase	P.e. (kW)	P.m. (W)	Corriente de fase	Eficiencia (%)	Carga (%)
185	1402	7,9	0,496	1,569	1159,86	2,787	73,92	105,44
			0,505			2,635		
			0,568			2,969		
167	1409	7,29	0,457	1,452	1075,64	2,627	74,08	97,79
			0,468			2,482		
			0,527			2,81		
149	1420	6,51	0,403	1,29	968,05	2,412	75,04	88,00
			0,416			2,288		
			0,471			2,593		
131	1429	5,91	0,363	1,174	884,40	2,266	75,33	80,40
			0,382			2,149		
			0,429			2,443		
113	1442	5,13	0,313	1,025	774,66	2,094	75,58	70,42
			0,335			1,988		
			0,377			2,271		
95	1453	4,3	0,262	0,878	654,28	1,958	74,52	59,48
			0,291			1,866		
			0,325			2,124		
77	1464	3,35	0,205	0,713	513,59	1,81	72,03	46,69
			0,241			1,726		
			0,267			1,991		
59	1475	2,47	0,156	0,567	381,52	1,713	67,29	34,68
			0,198			1,645		
			0,213			1,891		
41	1482	1,66	0,114	0,439	257,62	1,659	58,68	23,42
			0,159			1,601		
			0,166			1,836		
23	1486	1,18	0,085	0,355	183,62	1,611	51,73	16,69
			0,134			1,562		
			0,136			1,792		
0	1492	0,58	0,055	0,263	90,62	1,625	34,46	8,24
			0,105			1,568		
			0,103			1,804		

Tabla 15. Valores del ensayo realizado con el cuarto nivel de asimetría en el devanado

En la Figura 36 se puede ver la representación gráfica del valor de la eficiencia del motor en estado sano y la del motor con el cuarto nivel de asimetría en el devanado del estator.

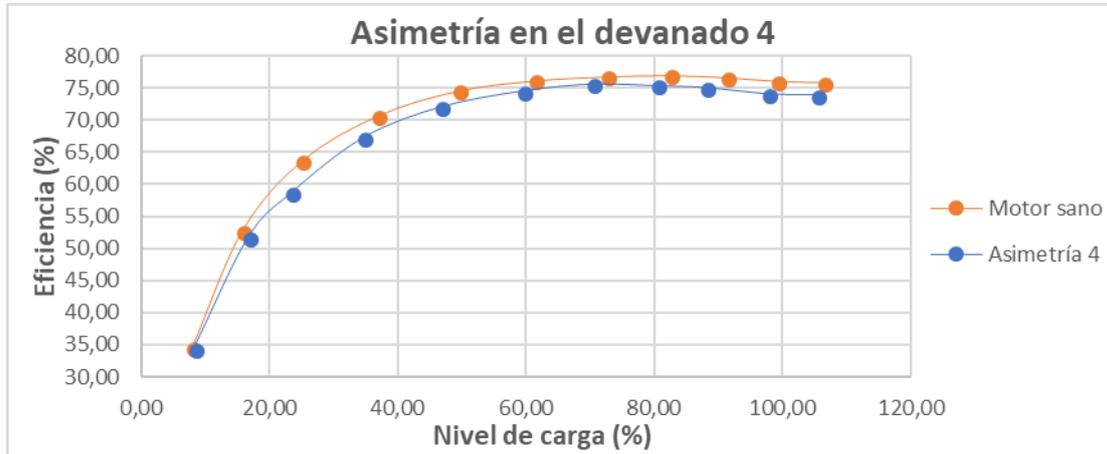


Figura 36. Comparación del desarrollo de la eficiencia de un motor sano con un motor con el cuarto nivel de asimetría en el devanado

El nivel de asimetría en el devanado del estator fue de un 52,94% del valor óhmico, en este último caso ya se aprecia cómo afecta este tipo de fallo en el rendimiento del motor. El valor de la eficiencia con este fallo es de $\eta = 74,08\%$ al 97,79% de su carga, teniendo una reducción del rendimiento en un poco más del 2% con referencia al motor sano.

En la Figura 37 se puede observar de manera general cómo se reduce la eficiencia en el motor a medida que la asimetría en el devanado del estator aumenta.

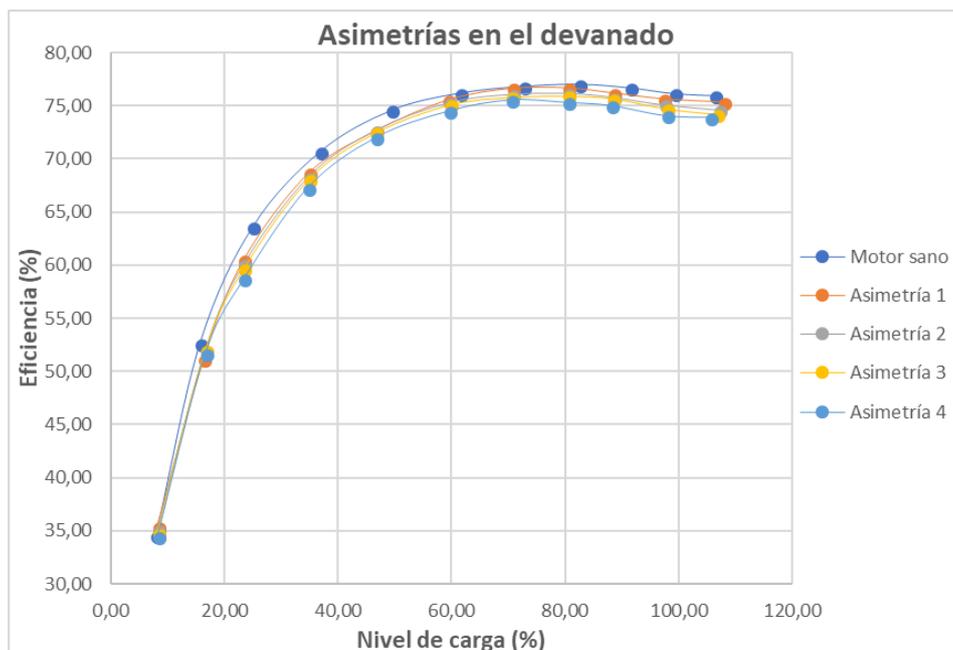


Figura 37. Comparación del desarrollo de la eficiencia de un motor sano con un motor con diferentes niveles de asimetría en el devanado

4.3. Fallos en el sistema de aislamiento

La Tabla 16 muestra los resultados del ensayo realizado con un motor con aislamiento sobrecalentado.

Voltaje DC (Excitación)	Velocidad (rpm)	Par (N.m)	P.e. por fase (kW)	P.e. (kW)	P.m. (W)	Corriente de fase	Eficiencia (%)	Carga (%)
185	1414	7,9	0,51	1,543	1169,78	2,846	75,81	106,34
			0,516			2,83		
			0,517			2,827		
170	1418	7,37	0,486	1,45	1094,39	2,704	75,48	99,49
			0,482			2,685		
			0,482			2,674		
155	1423	6,92	0,455	1,361	1031,19	2,581	75,77	93,74
			0,453			2,568		
			0,453			2,564		
140	1428	6,34	0,419	1,255	948,08	2,44	75,54	86,19
			0,419			2,442		
			0,417			2,43		
125	1435	5,76	0,381	1,14	865,57	2,309	75,93	78,69
			0,38			2,31		
			0,379			2,294		
110	1443	5,1	0,342	1,021	770,66	2,186	75,48	70,06
			0,341			2,168		
			0,338			2,161		
95	1452	4,4	0,3	0,894	669,03	2,054	74,84	60,82
			0,299			2,039		
			0,295			2,025		
80	1460	3,64	0,256	0,762	556,52	1,944	73,03	50,59
			0,256			1,919		
			0,25			1,908		
65	1470	2,86	0,211	0,629	440,26	1,851	69,99	40,02
			0,21			1,836		
			0,208			1,824		
50	1477	2,1	0,17	0,505	324,81	1,768	64,32	29,53
			0,169			1,758		
			0,166			1,754		
35	1484	1,44	0,133	0,396	223,78	1,736	56,51	20,34
			0,134			1,716		
			0,129			1,705		
20	1489	0,97	0,107	0,32	151,25	1,721	47,27	13,75
			0,109			1,703		
			0,104			1,688		
5	1492	0,63	0,091	0,269	98,43	1,728	36,59	8,95
			0,092			1,701		
			0,086			1,693		
0	1493	0,59	0,088	0,261	92,24	1,723	35,34	8,39
			0,091			1,691		
			0,082			1,649		

Tabla 16. Valores del ensayo realizado con fallo en el aislamiento

En la Figura 38 se puede ver la representación gráfica del valor de la eficiencia del motor en estado sano y la del motor con el aislamiento sobrecalentado.

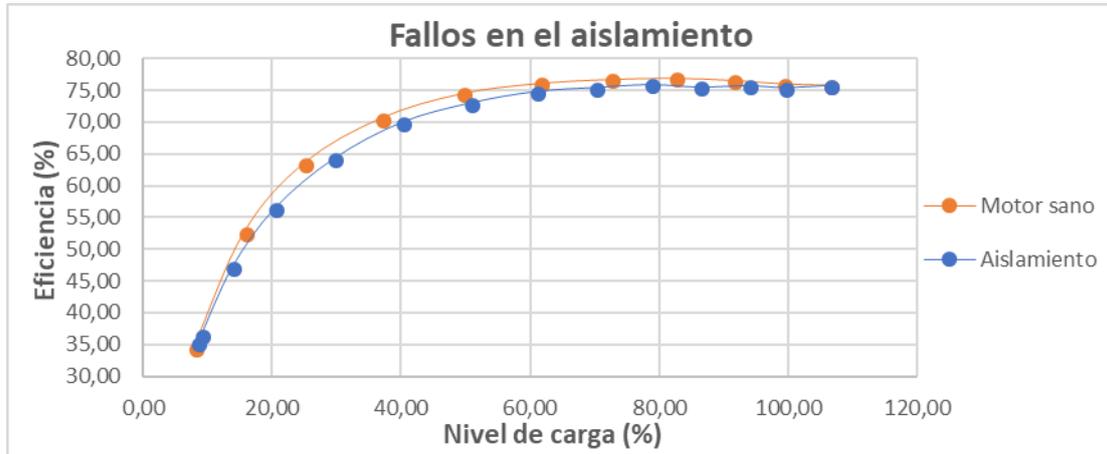


Figura 38. Comparación del desarrollo de la eficiencia de un motor sano con un motor con fallo en el aislamiento

En este ensayo con fallo en el aislamiento (sobrecalentamiento en dos fases), se observa que hay una ligera reducción del rendimiento del motor, el valor de la eficiencia es de $\eta = 75,48\%$ al $99,49\%$, teniendo una reducción del rendimiento aproximadamente de un $0,63\%$ con referencia al motor sano a plena carga.

La Tabla 17. Muestra los resultados del ensayo realizado con un segundo motor con aislamiento sobrecalentado durante un mayor periodo de tiempo.

Voltaje DC (Excitación)	Velocidad (rpm)	Par (N.m)	P.e. por fase (kW)	P.e. (kW)	P.m. (W)	Corriente de fase	Eficiencia (%)	Carga (%)
195	1350	7,74	0,532	1,586	1094,22	2,767	68,99	99,47
			0,525			2,761		
			0,529			2,747		
180	1364	7,4	0,504	1,5	1057,00	2,655	70,47	96,09
			0,495			2,636		
			0,501			2,634		
165	1376	6,97	0,47	1,401	1004,34	2,534	71,69	91,30
			0,463			2,518		
			0,468			2,515		
150	1392	6,51	0,436	1,297	948,96	2,411	73,17	86,27
			0,429			2,403		
			0,432			2,394		
135	1405	5,99	0,402	1,195	881,32	2,293	73,75	80,12
			0,394			2,275		
			0,399			2,268		
120	1418	5,39	0,363	1,078	800,38	2,163	74,25	72,76
			0,355			2,15		
			0,36			1,14		
105	1428	4,73	0,322	0,953	707,32	2,034	74,22	64,30
			0,315			2,033		
			0,316			2,005		
90	1444	4,01	0,277	0,822	606,37	1,918	73,77	55,12
			0,272			1,916		
			0,273			1,893		
75	1456	3,3	0,239	0,7	503,16	1,834	71,88	45,74
			0,23			1,827		
			0,231			1,798		
60	1466	2,55	0,196	0,573	391,47	1,756	68,32	35,59
			0,188			1,754		
			0,189			1,722		
45	1477	1,81	0,156	0,451	279,95	1,703	62,07	25,45
			0,148			1,717		
			0,147			1,675		
30	1484	1,24	0,125	0,357	192,70	1,678	53,98	17,52
			0,116			1,69		
			0,116			1,647		
15	1489	0,81	0,104	0,292	126,30	1,673	43,25	11,48
			0,095			1,693		
			0,093			1,644		
0	1492	0,55	0,09	0,25	85,93	1,681	34,37	7,81
			0,08			1,694		
			0,08			1,645		

Tabla 17. Valores del ensayo realizado con fallo en el aislamiento (sobrecalentamiento prolongado) y con temperatura elevada

En la Figura 39 se puede ver la representación gráfica del valor de la eficiencia del motor en estado sano y la del motor con el aislamiento sobrecalentado (segundo ensayo).

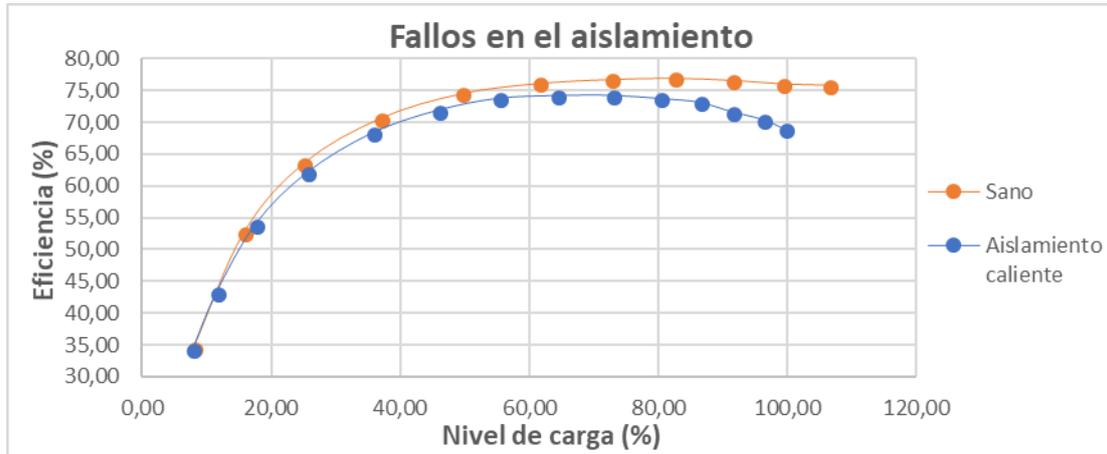


Figura 39. Comparación del desarrollo de la eficiencia de un motor sano con un motor con fallo en el aislamiento (sobrecalentamiento prolongado) y con temperatura elevada

El ensayo se realizó con el aislamiento totalmente sobrecalentado, en donde el valor de la eficiencia fue de $\eta = 68,47\%$ al 99,47 de la carga, además se midió la temperatura superficial que alcanzó en esas condiciones siendo de 130° C. La reducción de la eficiencia con relación al motor sano a plena carga fue aproximadamente del 7%.

Otro aspecto importante en los resultados es que a medida que se reducía el nivel de carga del motor con fallo, la temperatura disminuía de igual manera.

La Tabla 18 muestra los resultados del ensayo realizado con el segundo motor con aislamiento sobrecalentado durante un periodo de tiempo todavía mayor.

Voltaje DC (Excitación)	Velocidad (rpm)	Par (N.m)	P.e. por fase (kW)	P.e. (kW)	P.m. (W)	Corriente de fase	Eficiencia (%)	Carga (%)
185	1354	7,37	0,508	1,515	1045,00	2,658	68,98	95,00
			0,499			2,635		
			0,508			2,685		
168	1367	6,93	0,466	1,397	992,04	2,515	71,01	90,19
			0,465			2,508		
			0,466			2,503		
151	1389	6,43	0,427	1,282	935,28	2,381	72,95	85,03
			0,428			2,381		
			0,427			2,366		
134	1405	5,81	0,386	1,158	854,83	2,234	73,82	77,71
			0,388			2,23		
			0,384			2,208		
117	1419	5,21	0,349	1,042	774,19	2,098	74,30	70,38
			0,347			2,096		
			0,346			2,088		
100	1436	4,45	0,299	0,895	669,18	1,991	74,77	60,83
			0,299			1,982		
			0,297			1,965		
83	1453	3,68	0,254	0,758	559,94	1,883	73,87	50,90
			0,254			1,873		
			0,25			1,856		
66	1465	2,84	0,207	0,617	435,70	1,794	70,62	39,61
			0,207			1,765		
			0,203			1,762		
49	1476	1,98	0,161	0,48	306,04	1,72	63,76	27,82
			0,161			1,707		
			0,158			1,709		
32	1483	1,31	0,126	0,371	203,44	1,684	54,84	18,49
			0,125			1,67		
			0,12			1,675		
15	1488	0,89	0,104	0,303	138,68	1,692	45,77	12,61
			0,102			1,659		
			0,097			1,672		
0	1491	0,63	0,089	0,262	98,37	1,685	37,54	8,94
			0,088			1,656		
			0,085			1,662		

Tabla 18. Valores del ensayo realizado de un motor con fallo en el aislamiento (sobrecalentamiento prologado más tiempo) y temperatura elevada

En la Figura 40 se puede ver la representación gráfica del valor de la eficiencia del motor en estado sano y la del motor con el aislamiento sobrecalentado (tercer ensayo).

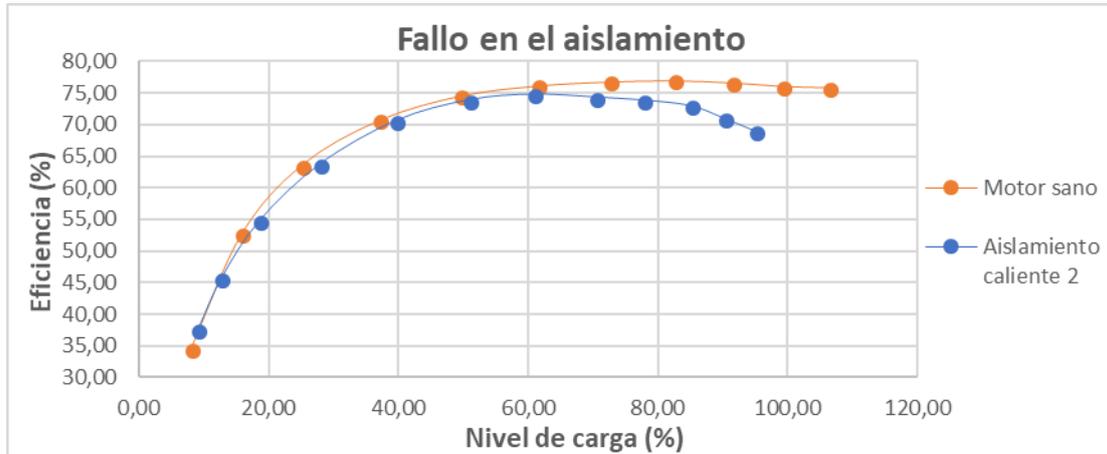


Figura 40. Comparación del desarrollo de la eficiencia de un motor sano con un motor con fallo en el aislamiento (sobrecalentamiento prologado más tiempo) y temperatura elevada

El ensayo se realizó con el aislamiento sobrecalentado debido a la operación con dos fases durante largo tiempo. Siguiendo el procedimiento, se aplicó los 185 VDC en la excitación del motor DC con lo cual se alcanzó un 95% de la carga del motor y el valor de la eficiencia fue $\eta = 68,98\%$; de igual manera se tomó la temperatura superficial en esas condiciones que fue de 140°C .

Debido a que no se llegó al 100% del nivel de carga y tomando en cuenta la tendencia de la curva se puede decir que la eficiencia al 100% del nivel de carga podría tener un valor de $\eta = 65\%$, al comparar con la eficiencia del motor sano a plena carga se tiene una reducción del rendimiento de aproximadamente 11%.

Al igual que en el anterior caso la temperatura del motor con este fallo disminuía conforme se reducía el nivel de carga del motor.

4.4. Excentricidades/desalineamientos

La Tabla 19 muestra los resultados del ensayo realizado con un motor con desalineación horizontal.

Voltaje DC (Excitación)	Velocidad (rpm)	Par (N.m)	P.e. por fase (kW)	P.e. (kW)	P.m. (W)	Corriente de fase	Eficiencia (%)	Carga (%)
185	1415	8,21	0,545	1,629	1216,55	2,965	74,68	110,60
			0,534			2,901		
			0,55			2,945		
170	1419	7,61	0,505	1,506	1130,83	2,794	75,09	102,80
			0,493			2,732		
			0,508			2,771		
155	1425	7,14	0,474	1,413	1065,47	2,67	75,40	96,86
			0,461			2,611		
			0,478			2,637		
140	1431	6,61	0,438	1,309	990,53	2,532	75,67	90,05
			0,429			2,48		
			0,442			2,512		
125	1438	5,97	0,401	1,19	899,00	2,392	75,55	81,73
			0,386			2,324		
			0,403			2,36		
110	1445	5,29	0,358	1,062	800,48	2,246	75,38	72,77
			0,344			2,18		
			0,36			2,212		
95	1454	4,53	0,31	0,919	689,75	2,093	75,05	62,70
			0,297			2,026		
			0,312			2,055		
80	1462	3,71	0,262	0,777	568,00	1,978	73,10	51,64
			0,249			1,899		
			0,266			1,922		
65	1472	2,8	0,209	0,622	431,61	1,848	69,39	39,24
			0,199			1,789		
			0,214			1,812		
50	1478	2,08	0,17	0,504	321,93	1,783	63,88	29,27
			0,159			1,715		
			0,175			1,738		
35	1484	1,38	0,132	0,392	214,46	1,746	54,71	19,50
			0,122			1,682		
			0,138			1,697		
20	1489	0,88	0,104	0,309	137,22	1,725	44,41	12,47
			0,094			1,664		
			0,111			1,669		
5	1492	0,56	0,088	0,258	87,50	1,719	33,91	7,95
			0,076			1,649		
			0,094			1,662		
0	1492	0,52	0,085	0,251	81,25	1,713	32,37	7,39
			0,075			1,65		
			0,091			1,663		

Tabla 19. Valores del ensayo realizado con desalineación horizontal en el motor

En la Figura 41 se puede ver la representación gráfica del valor de la eficiencia del motor en estado sano y la del motor con desalineación horizontal.

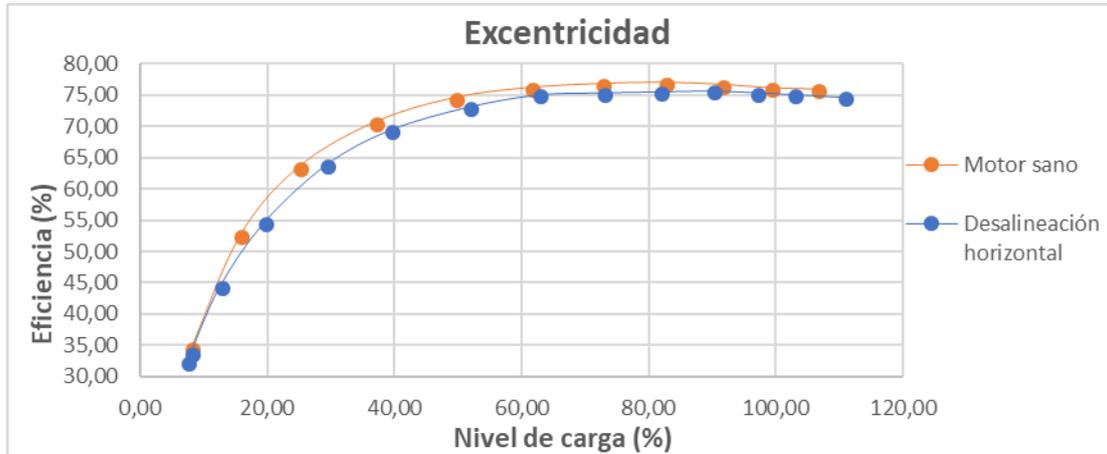


Figura 41. Comparación del desarrollo de la eficiencia de un motor sano con un motor con desalineación horizontal

Para generar este tipo de fallo, se desalineó el eje de forma horizontal (según manera anteriormente indicada); se movieron las patas delanteras del motor 3 mm hacia la derecha (tomando de referencia la parte frontal del motor).

El rendimiento con este tipo de desalineación del motor con fallo fue de $\eta = 75,09\%$ al 102,8% del nivel de carga, teniendo una disminución de aproximadamente un 1% al compararlo con el motor sano.

La Tabla 20 muestra los resultados del ensayo realizado con un motor con desalineación vertical.

Voltaje DC (Excitación)	Velocidad (rpm)	Par (N.m)	P.e. por fase (kW)	P.e. (kW)	P.m. (W)	Corriente de fase	Eficiencia (%)	Carga (%)
185	1413	8,11	0,537	1,598	1200,03	2,935	75,10	109,09
			0,52			2,85		
			0,541			2,895		
170	1417	7,63	0,506	1,507	1132,20	2,793	75,13	102,93
			0,492			2,727		
			0,509			2,761		
155	1423	7,11	0,47	1,401	1059,51	2,651	75,62	96,32
			0,457			2,591		
			0,474			2,62		
140	1429	6,55	0,437	1,298	980,17	2,522	75,51	89,11
			0,422			2,447		
			0,439			2,486		
125	1437	5,92	0,395	1,175	890,86	2,372	75,82	80,99
			0,382			2,298		
			0,398			2,334		
110	1445	5,25	0,356	1,051	794,43	2,231	75,59	72,22
			0,339			2,159		
			0,356			2,183		
95	1453	4,51	0,309	0,917	686,23	2,091	74,83	62,38
			0,296			2,021		
			0,312			2,043		
80	1463	3,66	0,26	0,766	560,73	1,952	73,20	50,98
			0,245			1,881		
			0,261			1,903		
65	1470	2,91	0,217	0,638	447,96	1,855	70,21	40,72
			0,202			1,791		
			0,219			1,805		
50	1478	2,15	0,174	0,511	332,77	1,789	65,12	30,25
			0,159			1,719		
			0,178			1,73		
35	1485	1,43	0,134	0,391	222,38	1,738	56,87	20,22
			0,119			1,665		
			0,138			1,667		
20	1490	0,92	0,108	0,313	143,55	1,737	45,86	13,05
			0,093			1,671		
			0,112			1,662		
5	1493	0,61	0,09	0,26	95,37	1,725	36,68	8,67
			0,076			1,664		
			0,094			1,565		
0	1493	0,56	0,087	0,252	87,55	1,728	34,74	7,96
			0,074			1,66		
			0,091			1,657		

Tabla 20. Valores del ensayo realizado con desalineación vertical en el motor

En la Figura 42 se puede ver la representación gráfica del valor de la eficiencia del motor en estado sano y la del motor con desalineación vertical.

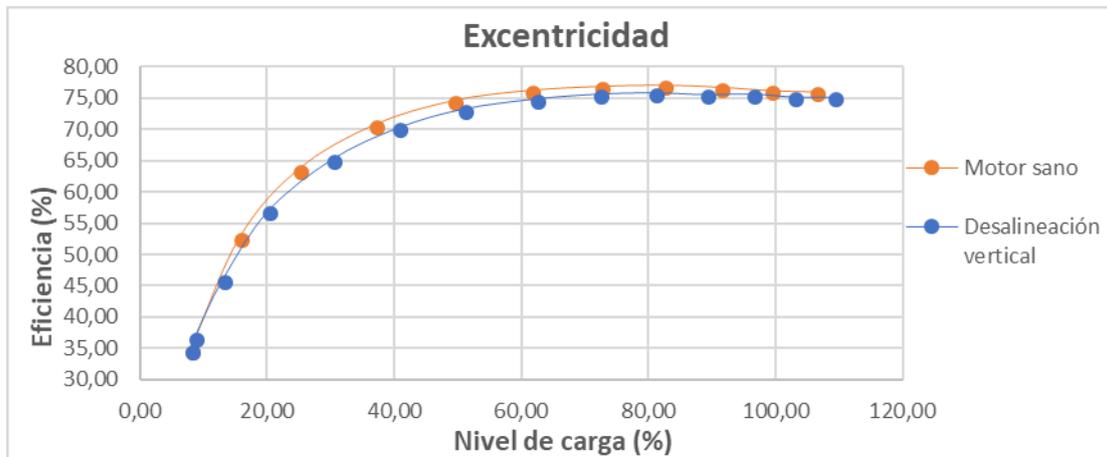


Figura 42. Comparación del desarrollo de la eficiencia de un motor sano con un motor con desalineación vertical

Al igual que el caso anterior, este fallo se generó desalineando el eje de manera vertical (según manera anteriormente indicada); se subió 1mm la pata delantera derecha (tomando de referencia la parte frontal del motor).

El rendimiento con este tipo de desalineación del motor con fallo fue de $\eta = 75,13\%$ al 102,93% del nivel de carga, teniendo una disminución de aproximadamente un 1% al compararlo con el motor sano.

La Tabla 21 muestra los resultados del ensayo realizado con un motor con fallos en la sujeción del motor (aflojamiento pernos de anclaje).

Voltaje DC (Excitación)	Velocidad (rpm)	Par (N.m)	P.e. por fase (kW)	P.e. (kW)	P.m. (W)	Corriente de fase	Eficiencia (%)	Carga (%)
185	1414	8,04	0,53	1,571	1190,51	2,887	75,78	108,23
			0,512			2,814		
			0,529			2,844		
170	1417	7,5	0,493	1,461	1112,91	2,734	76,17	101,17
			0,476			2,657		
			0,492			2,686		
155	1424	6,98	0,457	1,358	1040,86	2,596	76,65	94,62
			0,441			2,521		
			0,46			2,554		
140	1430	6,45	0,423	1,257	965,88	2,465	76,84	87,81
			0,407			2,387		
			0,427			2,426		
125	1437	5,81	0,384	1,138	874,30	2,319	76,83	79,48
			0,368			2,246		
			0,386			2,283		
110	1445	5,14	0,341	1,013	777,79	2,183	76,78	70,71
			0,327			2,106		
			0,345			2,141		
95	1454	4,43	0,299	0,887	674,52	2,051	76,05	61,32
			0,284			1,978		
			0,304			2,008		
80	1462	3,65	0,253	0,75	558,82	1,937	74,51	50,80
			0,238			1,852		
			0,259			1,886		
65	1470	2,84	0,209	0,613	437,18	1,829	71,32	39,74
			0,194			1,756		
			0,21			1,774		
50	1478	2,08	0,167	0,485	321,93	1,753	66,38	29,27
			0,151			1,692		
			0,167			1,695		
35	1485	1,38	0,13	0,375	214,60	1,722	57,23	19,51
			0,113			1,655		
			0,132			1,655		
20	1489	0,96	0,107	0,307	149,69	1,714	48,76	13,61
			0,091			1,649		
			0,109			1,635		
5	1492	0,63	0,089	0,256	98,43	1,701	38,45	8,95
			0,074			1,638		
			0,093			1,627		
0	1493	0,58	0,087	0,247	90,68	1,711	36,71	8,24
			0,071			1,647		
			0,089			1,633		

Tabla 21. Valores del ensayo realizado de un motor con excentricidad debido al aflojamiento en los pernos de anclaje

En la Figura 43 se puede ver la representación gráfica del valor de la eficiencia del motor en estado sano y la del motor con aflojamiento de pernos.

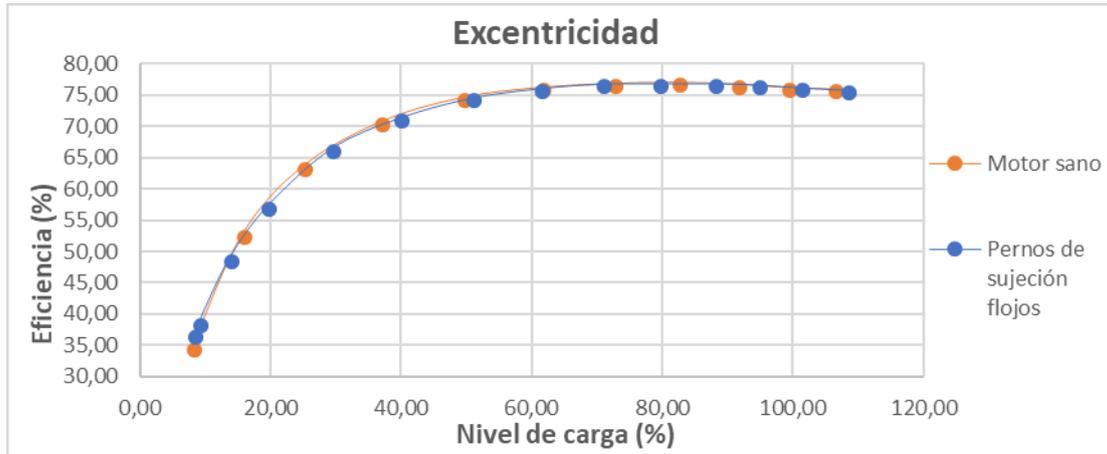


Figura 43. Comparación del desarrollo de la eficiencia de un motor sano con un motor con excentricidad debido al aflojamiento en los pernos de anclaje del motor

Como se observa en la anterior gráfica, este tipo de fallo no afecta de forma apreciable al rendimiento del motor; las curvas de evolución de la eficiencia del motor sano y del motor con fallo son muy similares, teniendo valores del rendimiento aproximadamente del 76,1% a plena carga.

4.5. Fallos en el sistema de ventilación

La Tabla 22 muestra los resultados del ensayo realizado con un motor con ventilación obstruida.

Voltaje DC (Excitación)	Velocidad (rpm)	Par (N.m)	P.e. por fase (kW)	P.e. (kW)	P.m. (W)	Corriente de fase	Eficiencia (%)	Carga (%)
185	1409	7,97	0,522	1,58	1175,97	2,856	74,43	106,91
			0,531			2,885		
			0,527			2,839		
168	1415	7,4	0,486	1,464	1096,52	2,695	74,90	99,68
			0,491			2,716		
			0,487			2,677		
151	1422	6,8	0,445	1,346	1012,60	2,538	75,23	92,05
			0,452			2,564		
			0,449			2,52		
134	1430	6,15	0,403	1,22	920,96	2,379	75,49	83,72
			0,411			2,407		
			0,406			2,371		
117	1439	5,42	0,356	1,08	816,75	2,219	75,62	74,25
			0,364			2,249		
			0,36			2,203		
100	1448	4,65	0,309	0,938	705,10	2,073	75,17	64,10
			0,316			2,102		
			0,313			2,058		
83	1459	3,75	0,258	0,783	572,95	1,938	73,17	52,09
			0,264			1,956		
			0,261			1,916		
66	1469	2,8	0,204	0,622	430,73	1,814	69,25	39,16
			0,21			1,836		
			0,208			1,801		
49	1477	2,02	0,161	0,492	312,44	1,751	63,50	28,40
			0,166			1,767		
			0,165			1,731		
32	1485	1,28	0,122	0,376	199,05	1,709	52,94	18,10
			0,128			1,735		
			0,126			1,698		
15	1490	0,79	0,096	0,299	123,27	1,694	41,23	11,21
			0,102			1,713		
			0,101			1,679		
0	1491	0,54	0,083	0,259	84,31	1,693	32,55	7,66
			0,089			1,716		
			0,087			1,678		

Tabla 22. Valores del ensayo realizado de un motor con ventilación obstruida

En la Figura 44 se puede ver la representación gráfica del valor de la eficiencia del motor en estado sano y la del motor con fallos en el sistema de ventilación.

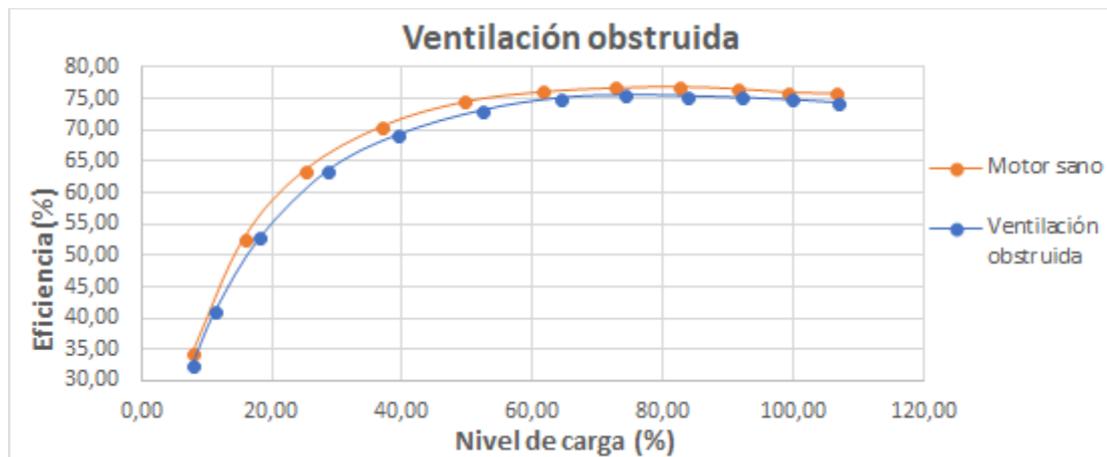


Figura 44. Comparación del desarrollo de la eficiencia de un motor sano con un motor con ventilación obstruida

En la gráfica anterior se observa que problemas en el sistema de ventilación reducen el rendimiento del motor. El valor de la eficiencia es de $\eta = 74,90\%$ al $99,68\%$ teniendo una disminución de poco más del 1% comparándolo con la del motor sano.

5. CONCLUSIONES

En este Trabajo Fin de Master se ha evaluado como repercute la presencia de diferentes tipos de fallo sobre la eficiencia (rendimiento) del motor a distintos niveles de carga. Si bien, se es consciente de que la presencia de averías puede afectar al rendimiento, son muy escasos los trabajos que ha abordado la computación real de la eficiencia para cada tipo de fallo, así como su comparación con el caso sano. En este sentido, las aportaciones de este trabajo son significativas ya que, no solamente confirman que la presencia de los fallos estudiados acaba afectando en mayor o menor medida al rendimiento, sino también que el efecto en términos de disminución de eficiencia puede llegar a ser muy notable. Esta información puede ser muy útil para usuarios industriales ya que enfatiza la importancia de la realización de un buen mantenimiento sobre los motores eléctricos, ya no solamente para evitar paradas intempestivas, sino también para garantizar que operen al nivel de eficiencia previsto por el fabricante.

De forma más específica, se han obtenido las siguientes conclusiones relativas a los distintos fallos considerados:

- El motor ensayado con 9 barras consecutivas rotas en el rotor de un total de 28 tuvo una disminución aproximada del 12% de la eficiencia en comparación al motor en las mismas condiciones de carga.
- Con los diferentes ensayos realizados con los motores con fallos en la asimetría del devanado del estator se demostró que a medida que la asimetría asciende, la eficiencia del motor se reduce.
- No se logró realizar un ensayo en condiciones extremas de asimetría del devanado (circuito abierto), debido a que el motor frenaba instantáneamente a plena carga.
- El primer caso que se ensayó con fallos en el aislamiento, el motor tenía dos devanados sobrecalentados y la reducción de la eficiencia a plena carga fue del 0.63%.
- El segundo caso que se analizó con fallo en el aislamiento fue con un motor con el aislamiento totalmente sobrecalentado, el nivel de la eficiencia se redujo en un 7% a plena carga y con una temperatura superficial de 130° C.
- En el tercer ensayo con fallo en el aislamiento se lo realizó con el mismo motor del caso anterior y se lo aplicó técnicas destructivas (sobrecalentamiento por múltiples arranques del motor), en donde la eficiencia se redujo en un 11% a plena carga con una temperatura superficial de 140° C.

- En los dos últimos casos se observó que a medida que se reduce el nivel de carga del motor, la temperatura superficial también disminuye y el nivel de eficiencia aumenta, nunca por encima de los valores de la eficiencia del motor sano. No se pudo conocer el estado del aislamiento de los motores que se utilizó en los ensayos con este tipo de fallo, debido a que el único equipo que dispone el laboratorio para el análisis del aislamiento es el “Megger”, el cual solo permite conocer el valor del aislamiento a tierra, más no el valor del aislamiento entre espiras.
- Se realizaron dos ensayos con desalineaciones del motor, en el primer caso se movió las patas delanteras del motor 3m. hacia la derecha, el segundo se subió la pata derecha delantera 1mm y se observó una reducción de la eficiencia en aproximadamente 1%.
- Como se conoce una excentricidad en el entrehierro del motor se puede dar debido al aflojamiento de los pernos del anclaje del motor, al realizar este tipo de ensayo se demostró que no afectaba sensiblemente el rendimiento del motor en los distintos niveles de carga. Para el anterior caso se debe tomar en cuenta que los acoples de la máquina son flexibles de goma, capaces de absorber vibraciones generadas por ese tipo de fallo.
- En el ensayo que se realizó con el motor con fallos en el sistema de ventilación se demostró que obstrucciones del aire de entrada al ventilador reducen la eficiencia del motor en un 1%.

Para lograr un ahorro de energía, no basta solo con utilizar motores de alta eficiencia se necesita la implantación de técnicas de mantenimiento que garanticen el correcto funcionamiento de los mismos, ya que como se demostró en este proyecto, lo que se gana en adquirir un motor de alta eficiencia se puede perder cuando el mismo trabaja en condición de fallo.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] <http://www.ticgalicia.com/2016/06/el-motor-de-jaula-de-ardilla-la-base-de.html>, fecha de consulta: 01/10/2018.
- [2] <https://automatismoindustrial.com/d-automatizacion/1-6-logica-cableada/arranque-mediante-resistencias-estatoricas/>, fecha de consulta 05/10/2018.
- [3] Óscar Duque Pérez, Marcelo Pérez Alonso, “Motores de Inducción: Técnicas de mantenimiento predictivo”, Editorial: @becedario, Primera Edición, 2005, pág. 38.
- [4] Chapman, Stephen J., “Máquinas eléctricas”, Quinta edición. Editorial Mc Graw Hill, 2012, pág. 241.
- [5] <http://www.tecnicaindustrial.es/TIFrontal/a-2743-determinacion-rendimiento-motores-induccion-trifasicos-segun-norma-iec-60034-2-1.aspx>, fecha de consulta 15 de octubre de 2018.
- [6] II Congreso Eficiencia Energética, Madrid 24 de octubre de 2012
- [7] Manés Fernández Cabanas, Manuel García Melero, Gonzalo Manuel Cano Rodríguez, Juan Solares Sariego, “Técnicas para el mantenimiento y diagnóstico de máquinas eléctricas rotativas”, Editorial: Marcombo BOIXAREU EDITORES, 1998, pág. 167.
- [8] <http://www.testmotors.com/es/portfolio-item/deteccion-excentricidad-motor/>, fecha de consulta 15/10/2018.
- [9] http://circuitor.es/docs/FT_M5_CVM96_SP.pdf, fecha de consulta 10/10/2018
- [10] <https://www.menzel-motors.com/iec-motors/>, fecha 18/10/2018
- [11] Antonio Jose Besa Gonzáles – Javier Carballeira Morado, “Diagnóstico y corrección de fallos de componentes mecánicos”, Editorial: Universitat Politècnica de València, Segunda edición, 2018.
- [12] Maëva Garcia, José Antonino-Daviu, “Efficiency assessment of induction motors operating under different fault conditions”, 2018 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT).

7. ANEXOS

Anexo 1. Tabla de niveles de eficiencia con normativa europea [10]

Minimum 50 Hz Efficiency [according to IEC/EN 60034-30-1:2014, IEC 60034-2-1:2014]																
Power kW	IE1 (Standard Efficiency)				IE2 (High Efficiency)				IE3 (Premium Efficiency)				IE4 (Super Premium Efficiency)			
	2 poles	4 poles	6 poles	8 poles	2 poles	4 poles	6 poles	8 poles	2 poles	4 poles	6 poles	8 poles	2 poles	4 poles	6 poles	8 poles
0,12	45	50	38,3	31	53,6	591	50,6	39,8	60,8	64,8	57,7	50,7	66,5	69,8	64,9	62,3
0,18	52,8	57	45,5	38	60,4	647	56,6	45,9	65,9	69,9	63,9	58,7	70,8	74,7	70,1	67,2
0,2	54,6	58,5	47,6	39,7	61,9	659	58,2	47,4	67,2	71,1	65,4	60,6	71,9	75,8	71,4	68,4
0,25	58,2	61,5	52,1	43,4	64,8	685	61,6	50,6	69,7	73,5	68,6	64,1	74,3	77,9	74,1	70,8
0,37	63,9	66	59,7	49,7	69,5	727	67,6	56,1	73,8	77,3	73,5	69,3	78,1	81,1	78	74,3
0,4	64,9	66,8	61,1	50,9	70,4	735	68,8	57,2	74,6	78	74,4	70,1	78,9	81,7	78,7	74,9
0,55	69	70	65,8	56,1	74,1	771	73,1	61,7	77,8	80,8	77,2	73	81,5	83,9	80,9	77
0,75	72,1	72,1	70	61,2	77,4	796	75,9	66,2	80,7	82,5	78,9	75	83,5	85,7	82,7	78,4
1,1	75	75	72,9	66,5	79,6	814	78,1	70,8	82,7	84,1	81	77,7	85,2	87,2	84,5	80,8
1,5	77,2	77,2	75,2	70,2	81,3	828	79,8	74,1	84,2	85,3	82,5	79,7	86,5	88,2	85,9	82,6
2,2	79,7	79,7	77,7	74,2	83,2	843	81,8	77,6	85,9	86,7	84,3	81,9	88	89,5	87,4	84,5
3	81,5	81,5	79,7	77	84,6	855	83,3	80	87,1	87,7	85,6	83,5	89,1	90,4	88,6	85,9
4	83,1	83,1	81,4	79,2	85,8	866	84,6	81,9	88,1	88,6	86,8	84,8	90	91,1	89,5	87,1
5,5	84,7	84,7	83,1	81,4	87	877	86	83,8	89,2	89,6	88	86,2	90,9	91,9	90,5	88,3
7,5	86	86	84,7	83,1	88,1	887	87,2	85,3	90,1	90,4	89,1	87,3	91,7	92,6	91,3	89,3
11	87,6	87,6	86,4	85	89,4	898	88,7	86,9	91,2	91,4	90,3	88,6	92,6	93,3	92,3	90,4
15	88,7	88,7	87,7	86,2	90,3	906	89,7	88	91,9	92,1	91,2	89,6	93,3	93,9	92,9	91,2
18,5	89,3	89,3	88,6	86,9	90,9	912	90,4	88,6	92,4	92,6	91,7	90,1	93,7	94,2	93,4	91,7
22	89,9	89,9	89,2	87,4	91,3	916	90,9	89,1	92,7	93	92,2	90,6	94	94,5	93,7	92,1
30	90,7	90,7	90,2	88,3	92	923	91,7	89,8	93,3	93,6	92,9	91,3	94,5	94,9	94,2	92,7
37	91,2	91,2	90,8	88,8	92,5	927	92,2	90,3	93,7	93,9	93,3	91,8	94,8	95,2	94,5	93,1
45	91,7	91,7	91,4	89,2	92,9	931	92,7	90,7	94	94,2	93,7	92,2	95	95,4	94,8	93,4
55	92,1	92,1	91,9	89,7	93,2	935	93,1	91	94,3	94,6	94,1	92,5	95,3	95,7	95,1	93,7
75	92,7	92,7	92,6	90,3	93,8	940	93,7	91,6	94,7	95	94,6	93,1	95,6	96	95,4	94,2
90	93	93	92,9	90,7	94,1	942	94	91,9	95	95,2	94,9	93,4	95,8	96,1	95,6	94,4
110	93,3	93,3	93,3	91,1	94,3	945	94,3	92,3	95,2	95,4	95,1	93,7	96	96,3	95,8	94,7
132	93,5	93,5	93,5	91,5	94,6	947	94,6	92,6	95,4	95,6	95,4	94	96,2	96,4	96	94,9
160	93,8	93,8	93,8	91,9	94,8	949	94,8	93	95,6	95,8	95,6	94,3	96,3	96,6	96,2	95,1
200	94	94	94	92,5	95	95,1	95	93,5	95,8	96	95,8	94,6	96,5	96,7	96,3	95,4
250	94	94	94	92,5	95	95,1	95	93,5	95,8	96	95,8	94,6	96,5	96,7	96,5	95,4
315	94	94	94	92,5	95	95,1	95	93,5	95,8	96	95,8	94,6	96,5	96,7	96,6	95,4
355	94	94	94	92,5	95	95,1	95	93,5	95,8	96	95,8	94,6	96,5	96,7	96,6	95,4
400	94	94	94	92,5	95	95,1	95	93,5	95,8	96	95,8	94,6	96,5	96,7	96,6	95,4
450	94	94	94	92,5	95	95,1	95	93,5	95,8	96	95,8	94,6	96,5	96,7	96,6	95,4
500-1000	94	94	94	92,5	95	95,1	95	93,5	95,8	96	95,8	94,6	96,5	96,7	96,6	95,4