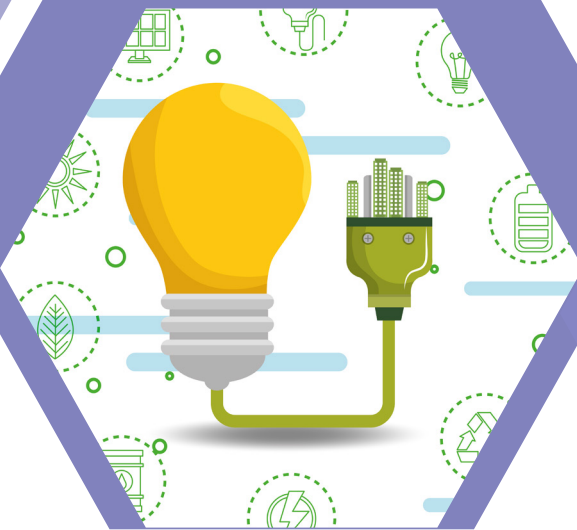


Motores de Inducción para el Ahorro de Energía Eléctrica



ARMANDO FELIPE CALCINA SOTELO
AMADOR GODOFREDO VILCATOMA SÁNCHEZ
NILTON JAVIER ARZAPALO MARCELO
ROBERTO CÉSAR ASTO HINOJOSA


EDITORIAL
TERCER SOL
MEXICO

Motores de Inducción para el Ahorro de Energía Eléctrica

**ARMANDO FELIPE CALCINA SOTELO
AMADOR GODOFREDO VILCATOMA SÁNCHEZ
NILTON JAVIER ARZAPALO MARCELO
ROBERTO CÉSAR ASTO HINOJOSA**

Armando Felipe Calcina Sotelo

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1800-1891>

Perfil: Ingeniero Mecánico de la Universidad Nacional del Centro del Perú, habilitado por el ejercicio profesional por el Colegio de Ingenieros del Perú. Docente Auxiliar adscrito a la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Nacional del Centro del Perú. Docente adscrito a la Escuela de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Nacional del Centro del Perú, con grado de Magíster en Tecnología Energética de la Universidad Nacional del Centro del Perú; Doctor en Ciencias de la Educación de la Universidad Nacional del Centro del Perú.

Afiliación: Universidad Nacional del Centro del Perú.

Perú

Amador Godofredo Vilcatoma Sánchez

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6533-3197>

Perfil: Doctor en Psicología Educativa y Tutorial, Magister en Docencia e Investigación en Educación Superior, con estudios concluidos en la maestría de Enseñanza de la Matemática y Licenciado en Educación en la especialidad de Matemática y Física. Experiencia en docencia universitaria en pre y posgrado en asignaturas de: matemática, álgebra lineal, análisis matemático, teoría curricular, estadística e investigación cuantitativa y cualitativa.

Afiliación: Universidad Nacional del Centro del Perú.

Perú

Nilton Javier Arzapalo Marcelo

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-6323-6726>

Afiliación: Universidad Nacional del Centro del Perú.

Perú

Roberto César Asto Hinojosa

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8384-496X>

Perfil: Ingeniero Zootecnista, Magister en Gerencia Social en Pontificia Universidad Católica del Perú; con especialización en Emprendimiento Social y Propiedad Intelectual por INDECOPI y la OMPI, Formulación, Ejecución, Residencia y Evaluación de Proyectos Productivos, Proyectos Científicos, Invierte.pe. Me desempeñe en funciones técnicas y gerenciales en el ámbito de la Gestión de Proyectos Productivos, Regional y Nacional en Instituciones Públicas Agrarias. Actualmente laboro en la Dirección de Transferencia Tecnológica de la UNCP.

Afiliación: Universidad Nacional del Centro del Perú.

Perú

Todas nuestras publicaciones son sometidas a revisión doble-ciego de pares académicos (Peer Review Double Blind).

Esta publicación cuenta con licencia Creative Commons Reconocimiento - NoComercial - SinObraDerivada 3.0 Unported License.



ISBN 978-607-59764-1-9

© Armando Felipe Calcina Sotelo
© Amador Godofredo Vilcatoma Sánchez
© Nilton Javier Arzapalo Marcelo
© Roberto César Asto Hinojosa

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.8178965>

© Editorial Tercer Sol
2023

www.editorialtercersol.com

Este libro es resultado de la investigación *Optimización del funcionamiento de un motor de inducción para el aborro de energía eléctrica en el laboratorio UNCP*, realizada en la Universidad Nacional del Centro del Perú.

Queda prohibida la reproducción bajo cualquier modalidad de toda o una parte de esta obra sin autorización expresa del titular de los derechos

Edición electrónica: Editorial Tercer Sol

Editado en México
Published in Mexico

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	9
CAPÍTULO I	11
MÁQUINAS ELÉCTRICAS ROTATIVAS	11
1.1. Fundamentos	11
1.1.1. <i>Electromagnetismo</i>	12
1.2. Leyes fundamentales	14
1.2.1. <i>Ley de Lenz</i>	15
1.2.2. <i>Ley de Ampere</i>	16
1.2.3. <i>Ley de Laplace</i>	16
1.3. Elementos de una máquina rotativa eléctrica	16
1.4. Clasificación de las máquinas rotativas eléctricas	18
1.4.1. <i>Motores</i>	19
1.4.2. <i>Generadores</i>	19
1.5. Clasificación de los motores	19
1.5.1. <i>Motores de corriente alterna</i>	19
1.5.2. <i>Motores de corriente continua</i>	22
1.5.3. <i>Motores trifásicos</i>	23
1.5.4. <i>Motores monofásicos</i>	23
CAPÍTULO II	25
MOTORES DE INDUCCIÓN O ASÍNCRONOS	25
2.1. Definición	25
2.2. Elementos constitutivos	25
2.2.1. <i>Estator</i>	25
2.2.2. <i>Rotor</i>	25
2.3. Principio de funcionamiento	27
2.4. Torque de rotación	28
2.5. Curva característica del motor de inducción	29
2.6. Tipos de carga	31
2.7. Arranque	32
2.7.1. <i>Arranque directo</i>	32
2.7.2. <i>Arranque estrella-triángulo</i>	33
2.7.3. <i>Arranque suave</i>	33

2.8. Potencia	33
2.8.1. Tipos de potencia	33
2.8.2. Factor de potencia	35
2.8.3. Problemas por bajo factor de potencia	35
2.9. Temperatura	35
2.10. Análisis de rendimiento	35
2.11. Variación de velocidad de motores de inducción	36
2.12. Convertidor de frecuencia variable	37
2.13. Motores eléctricos de alta eficiencia	38
CAPÍTULO III	39
OPTIMIZACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN PARA EL AHORRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA	39
3.1. Objetivo	39
3.2. Objetivos específicos	39
3.3. Hipótesis	39
3.4. Variables	39
3.4.1. Variable independiente: funcionamiento del motor de inducción	40
3.4.2. Variable dependiente: ahorro de energía	40
3.4.3 Matriz operacional	40
3.5. Tipo de investigación	40
3.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos	41
3.7. Unidad de estudio	41
3.8. Técnicas de procesamiento y análisis de datos	41
3.9. Resultados	41
3.9.1. Ensayos experimentales	42
3.9.2. Pruebas de funcionamiento y arranque del motor asíncrono	42
3.10. Análisis estadístico	48
3.11. Análisis inferencial	51
3.12. Discusión de resultados	53
CONCLUSIONES	55
RECOMENDACIONES	56
CAPÍTULO IV	57
IMPORTANCIA Y BENEFICIOS DEL AHORRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN MOTORES DE INDUCCIÓN	57
REFLEXIONES FINALES	59
BIBLIOGRAFÍA	61

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Reducción requerida en las pérdidas en los conductores para aumentar la eficiencia en un punto	38
Tabla 2	Matriz operacional de la variable independiente: funcionamiento del motor de inducción	40
Tabla 3	Matriz operacional de la variable dependiente: Ahorro de energía	40
Tabla 4	Diseño y datos de motor	42
Tabla 5	Amperajes de consumo en las fases (Amperios)	44
Tabla 6	Medición de consumo de energía una hora	44
Tabla 7	Medición de consumo de energía por ocho horas de trabajo con arranque estrella-triángulo	45
Tabla 8	Medición de consumo de energía con convertidor de frecuencia variable (una hora)	47
Tabla 9	Medición de consumo de energía por ocho horas de trabajo con convertidor de frecuencia variable	47
Tabla 10	Diferencia de consumo de energía entre arranque estrella-triángulo y convertidor de frecuencia variable	48
Tabla 11	Diferencia de consumo de energía para 60 Hz	49
Tabla 12	Diferencia de consumo de energía para 50 Hz	50
Tabla 13	Diferencia de consumo de energía para 40 Hz	50
Tabla 14	Proyección de ahorro de energía	51
Tabla 15	Pruebas de normalidad	52
Tabla 16	Prueba de t -student	52

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Esquema de conversión de energía como motor o generador	12
Figura 2	Flujo magnético a través de una superficie plana perpendicular al campo	13
Figura 3	Líneas de campo magnético generadas en una espira por el paso de corriente	14
Figura 4	Oposición de campos magnéticos y variaciones en el flujo de la espira	15
Figura 5	Ley de la circulación del campo magnético y su relación con la corriente eléctrica	16
Figura 6	Elementos de una máquina rotativa eléctrica	17
Figura 7	Chapa magnética del estator (a) y del rotor (b)	18
Figura 8	Clasificación de máquinas eléctricas rotativas	19
Figura 9	Motor CA con rotor cilíndrico (a) y con rotor de polos salientes (b)	20
Figura 10	Circuito equivalente de un motor síncrono	21
Figura 11	Circuito de modelo de transformador de un motor de inducción	22
Figura 12	Diagrama de una máquina de CC	22
Figura 13	Circuito equivalente de un motor CC	23
Figura 14	Motor monofásico	24
Figura 15	Diagrama de un rotor de jaula de ardilla	26
Figura 16	Diagrama de un rotor devanado	26
Figura 17	Determinación del sentido de la fuerza en el conductor del rotor en una ranura	27
Figura 18	Determinación del sentido de la fuerza	29
Figura 19	Curva característica torque-velocidad de un motor de inducción típico y con intervalos extendidos	30
Figura 20	Curva característica torque-velocidad de un rotor devanado	31
Figura 21	Triángulo de potencia	34
Figura 22	Triángulo de potencia	36
Figura 23	Componentes principales de un convertidor de frecuencia variable	37
Figura 24	Diseño de experimentación utilizado en la investigación	41
Figura 25	Tablero de arranque Estrella Triángulo (Delta)	43
Figura 26	Arranque estrella-triángulo	43
Figura 27	Pruebas de arranque estrella- triángulo	44
Figura 28	Medición de consumo de energía del sistema estrella-triángulo	44
Figura 29	Medición de consumo de energía del sistema estrella-triángulo por ocho horas de trabajo continuo	45
Figura 30	Convertidor de frecuencia variable	46
Figura 31	Ajuste del convertidor de frecuencia variable	46
Figura 32	Pruebas de arranque con convertidor de frecuencia variable	46
Figura 33	Consumo de energía con convertidor de frecuencia variable una hora	47
Figura 34	Medición de consumo de energía con convertidor de frecuencia variable por ocho horas de trabajo continuo	48
Figura 35	Diferencia de consumo de energía entre arranque estrella-triángulo y convertidor de frecuencia variable	49
Figura 36	Ahorro de energía con convertidor de frecuencia variable	51
Figura 37	Prueba de t-student	53

INTRODUCCIÓN

En el presente libro se presenta las principales características, elementos, funciones y clases de máquinas eléctricas rotativas, equipos esenciales en el mundo contemporáneo para el desarrollo de la industria y el funcionamiento de las máquinas de uso diario; además, se resalta la importancia de los motores de inducción en la actualidad y se brinda recomendaciones para optimizar su manejo en el ámbito laboral, empresarial o industrial.

En el primer capítulo se hace referencia a las máquinas eléctricas rotativas y se aborda su funcionamiento desde lo fundamental y teórico hasta lo material y mecánico. De igual modo, se presentan las leyes fundamentales que permiten el funcionamiento de dichas máquinas, y la importancia del rol que cumple el electromagnetismo en ellas. En la parte material, se exploran los principales elementos que conforman la máquina, sus respectivas funciones y la relación o interacción que poseen unas partes con respecto a otras. Por último, se muestra una clasificación de las máquinas según su función y su circuito, de modo que se profundiza en la clasificación de los motores, considerando sus circuitos y, también, su número de fases.

En el capítulo segundo se profundiza en cuanto al modelo del motor de inducción o motor asíncrono, contrastándose con otros modelos en cuestión. En principio, se establece la definición, las características y los elementos constitutivos del motor de inducción, con el objetivo de determinar cuáles son los beneficios que este modelo de motor brinda a la industria; así mismo, se detallan brevemente los principios de su funcionamiento y se establecen los cálculos necesarios para calificar de manera cuantitativa los beneficios de esta máquina en términos de eficiencia, potencia y ahorro energético. Posteriormente, se abordan los procesos que se ejecutan en el procedimiento de la conversión de energía, y la capacidad de manejo y control que ofrece este modelo de motor para el uso personalizado a largo plazo, sin perder eficiencia ni causar gastos extras. De igual modo, se abordan los procesos para convertir un motor de inducción regular en otro de alta eficiencia, así como los beneficios que trae consigo un motor de esta clase en el desarrollo de una empresa.

En el tercer capítulo se examinan los beneficios de la utilización del convertidor de frecuencia variable para la optimización de la maquinaria utilizada en la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Nacional del Centro del Perú; además de los beneficios que brinda para la reducción de costos por uso de corriente eléctrica y por pérdidas de energía en diferentes áreas del motor.

Por último, se brindan algunas recomendaciones para la mejora de procesos en el mantenimiento de las máquinas y el reemplazo de modelos por otros con sistemas más prácticos y actualizados; de modo que el presente estudio revela un valioso aporte para el *modus operandi* de toda la industria, pues las recomendaciones pueden ser aplicadas de la misma manera en diferentes empresas.

CAPÍTULO I

MÁQUINAS ELÉCTRICAS ROTATIVAS

Históricamente, los motores eléctricos han sido una de las mayores aportaciones a la ingeniería mecánica, puesto que estos permitieron que se desarrollara la Revolución Industrial como la conocemos el día de hoy; gracias a las investigaciones de Nikola Tesla, se pudieron desarrollar los motores de corriente alterna que permitieron implementar la mencionada corriente y el tipo de energía correspondiente. A partir de ello, se desarrollaron las primeras máquinas que permitían la conversión de la energía eléctrica en mecánica y que, posteriormente, potenciarían el funcionamiento de las grandes maquinarias.

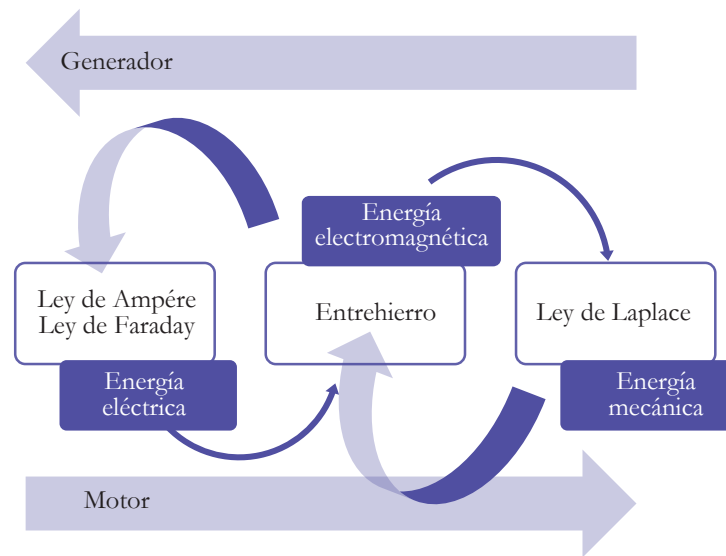
Como señala Chapman (2000), en la actualidad, la importancia de este tipo de máquinas radica en que se puede encontrar fácilmente en la vida cotidiana, tanto en los hogares como en los centros laborales; ello se debe a que se considera que la electricidad es una fuente de energía limpia que se puede controlar con facilidad y que su estructura no requiere la presencia de ventilación o del uso de combustibles constantes.

1.1. Fundamentos

De acuerdo con Gómez Suárez (2020), el fundamento principal de las máquinas eléctricas rotativas es que son reversibles; en otras palabras, son capaces de convertir la energía eléctrica en mecánica, y viceversa, por lo cual se pueden utilizar como motores cuando la energía eléctrica es consumida y administrada, o como generadores cuando la carga motriz induce a la salida de la energía eléctrica (p. 2).

Para Gómez (2020) este tipo de máquina cuenta con un espacio físico, donde se transfiere la energía del inductor al inducido conocido como entrehierro; este espacio se encuentra en medio del diámetro interior de núcleo magnético del estator y el exterior del rotor (p. 3).

Figura 1 Esquema de conversión de energía como motor o generador



Nota. Tomado de Gómez Suárez, 2020.

Como se puede observar en la Figura 1, por una parte, en el funcionamiento como motor, la energía eléctrica es introducida por el devanado del estator a partir de una fuente externa; luego, se produce energía electromagnética en el entrehierro, lo cual inicia el proceso de giro de la máquina de acuerdo con la ley de Laplace; finalmente, la energía transformada que sale, es energía mecánica. Por otra parte, en el funcionamiento como generador sucede lo contrario, ya que la carga motriz externa arrastra el rotor e induce en el estator una energía de salida que es eléctrica, señala el autor.

1.1.1. Electromagnetismo

Se describe como electromagnetismo a las interacciones que se dan entre los campos eléctricos y los campos magnéticos en las máquinas eléctricas, de acuerdo con los fundamentos de la inducción electromagnética de Michael Faraday y las aportaciones de las ecuaciones de James Clerk Maxwell (Gómez, 2020, p. 3). Los fenómenos electromagnéticos, como el flujo magnético y el campo magnético, son esenciales para el funcionamiento adecuado de las máquinas eléctricas rotativas y estáticas. Cabe señalar que la fuerza electromotriz inducida se produce en el motor, que es de naturaleza sostenible.

De acuerdo con Serrano Iribarnegaray y Martínez Román (2017), el flujo magnético (Φ) se puede definir como el número de líneas de fuerza de inducción que ingresan o salen de una superficie (p. 9); se trata, pues, de la medida de la cantidad del magnetismo que corresponde con el producto escalar del vector del campo magnético ($\vec{B}$) y el vector infinitesimal de superficie. Su unidad de medida, según el Sistema Internacional de Unidades, es el weber (Wb) (Gómez, 2020, p. 6). El flujo magnético se puede calcular a partir de la siguiente expresión:

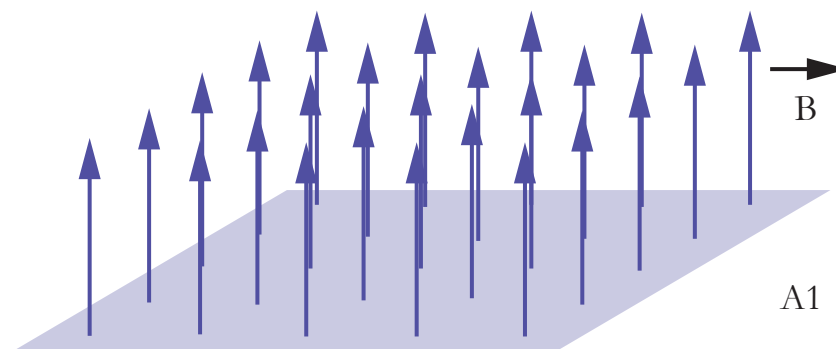
$$\Phi = \oint \vec{B} \cdot d\vec{S} \cdot \cos \theta$$

Puesto que, generalmente, la inducción magnética es constante en la sección transversal de las chapas magnéticas, se puede expresar el flujo magnético de la siguiente forma:

$$\Phi = B \cdot A$$

Donde A es el área de la superficie A_1 (Gómez, 2020, p. 6) en la siguiente figura.

Figura 2 Flujo magnético a través de una superficie plana perpendicular al campo



Nota. Tomado de Serrano Iribarnegaray y Martínez Román, 2017.

Sin embargo, si se inclina la superficie en un ángulo entre los 0° y los 180° (θ), el flujo se expresa con la siguiente fórmula:

$$\Phi = B \cdot A \cos \theta$$

Un campo magnético se genera a partir de la circulación de corrientes eléctricas, de la interacción de imanes permanentes en servomotores o generadores pequeños, o de las excitaciones de los alternadores síncronos de corriente alterna. La presencia de un campo magnético permite que se realice la conversión de la corriente alterna en continua o viceversa (Gómez, 2020, p. 4).

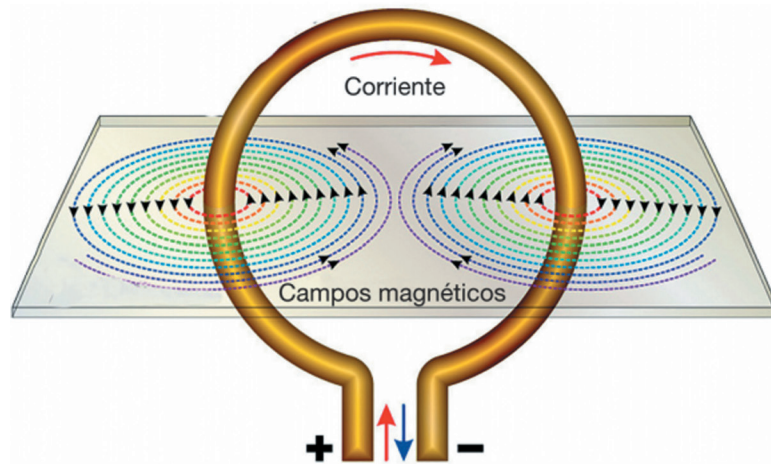
Así, a través del uso y propiedades de los campos magnéticos, podemos establecer las siguientes propiedades:

- Un campo magnético se crea, siempre y cuando una corriente eléctrica circule a través de un conductor.
- Una fuerza es ejercida sobre un conductor, siempre y cuando la corriente circule por un campo magnético.
- Se produce una diferencia de potencial.

La magnitud del campo magnético (B) en un motor eléctrico se calcula según la fórmula correspondiente a la Ley de Biot-Savart, que considera la corriente que circula en la espira (I), el radio de la espira en metros (R) y la permeabilidad magnética del vacío (μ_0):

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I}{2 \cdot R}$$

Figura 3 Líneas de campo magnético generadas en una espira por el paso de corriente



Nota. Tomado de Gómez, 2020.

Mientras que, en el caso de una bobina, la expresión es la siguiente, teniendo de referencia la Ley de Ampere, para lo cual se considera el número de espiras (N) y la longitud de la bobina (L):

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I \cdot N}{L}$$

1.2. Leyes fundamentales

Algunas de las propiedades de los campos magnéticos, que forman parte de las leyes fundamentales de las máquinas eléctricas rotativas, se identifican con la corriente eléctrica que pasa por un conductor, y, a su vez, se produce un campo magnético a su alrededor. Un campo magnético variable en el tiempo puede inducir a una diferencia de potencial en cada bobina, y que, si un conductor por el que circula corriente se encuentra inmerso en un campo magnético, este sufre una fuerza sobre sí mismo (Gómez, 2020, p. 4).

Los principios y leyes que rigen el funcionamiento de las máquinas eléctricas se encuentran definidos por la Ley de la inducción electromagnética de Faraday, la cual define la manera en que la variabilidad del campo magnético somete el comportamiento físico de una bobina y produce una fuerza electromotriz proporcional a la misma (Gómez, 2020, p. 7).

Para Verdezoto (2016) dicha ley expresa que la fuerza electromotriz (FEM), inducida en una bobina con N número de vueltas, es proporcional a la velocidad de la variación del flujo magnético ($d\Phi$) en un tiempo determinado (dt); la Ley de Faraday se define según la siguiente expresión, teniendo en consideración la oposición en la Ley de Lenz:

$$E = -N \cdot \frac{d\Phi}{dt}$$

1.2.1. Ley de Lenz

De acuerdo con Verdezoto (2016), la Ley de Lenz es una noción que determina el sentido de la corriente inducida en un circuito cerrado, dado que la FEM y la corriente eléctrica tienden a oponerse a los cambios en las líneas del flujo magnético (p. 6).

Como plantea Gómez (2020), esta ley determina que el campo magnético, inducido en un conductor, será contrario al campo magnético que lo causa; dado que, en una espira de contorno cerrado, la circulación del campo eléctrico inducido mueve los electrones, cuya resistencia origina la circulación de corriente eléctrica (p. 8). La Ley de Lenz se puede expresar de la siguiente manera:

$$\varepsilon = \oint_C E_{ind} \cdot dl$$

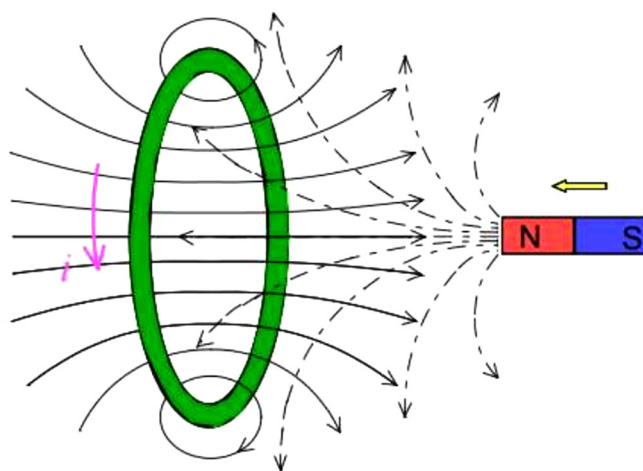
$$E_{ind} = R \cdot I_{ind}$$

$$\oint B dl = \mu_0 \cdot I$$

$$\oint B_{ind} \cdot dl = \mu_0 \cdot I_{ind}$$

De manera gráfica, de acuerdo con esta ley, la corriente inducida en la espira genera que esta se comporte como un imán, cuyo campo electromagnético es contrario al del imán externo; en este caso, el movimiento del imán externo es el que produce la corriente inducida, la cual actúa en sentido contrario al movimiento, tal como se representa en la siguiente figura:

Figura 4 Oposición de campos magnéticos y variaciones en el flujo de la espira



Nota. Tomado de Verdezoto, 2016.

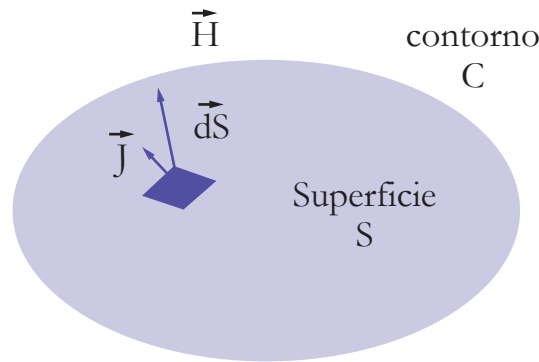
1.2.2. Ley de Ampere

La Ley de Ampere, según Gómez (2020), es aquella que define que la intensidad de la circulación del campo magnético en un circuito es cerrada y proporcional a la corriente que recorre el contorno (p. 9).

De acuerdo con Serrano y Martínez (2017), la Ley de Ampere, o la Ley de la circulación del campo, es una de las tres leyes físicas fundamentales que se requieren para determinar el campo magnético de una porción del espacio ocupado por una máquina eléctrica. Esta ley plantea que la circulación de un vector (H) en una curva cerrada (C), que delimita una superficie, es equivalente a la corriente neta que la atraviesa; ello se puede expresar de la siguiente manera, considerando a J como el vector de densidad superficial de corriente (Amperios/m²):

$$NI = \oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = \iint_S \vec{J} \cdot d\vec{S}$$

Figura 5 Ley de la circulación del campo magnético y su relación con la corriente eléctrica



Nota. Tomado de Serrano y Martínez, 2017.

En consecuencia, la fuerza magnetomotriz de un circuito cerrado arbitrario es correspondiente a la suma de las caídas de tensión magnética que se presenten en todos los tramos del circuito (Serrano y Martínez, 2017, p. 21).

1.2.3. Ley de Laplace

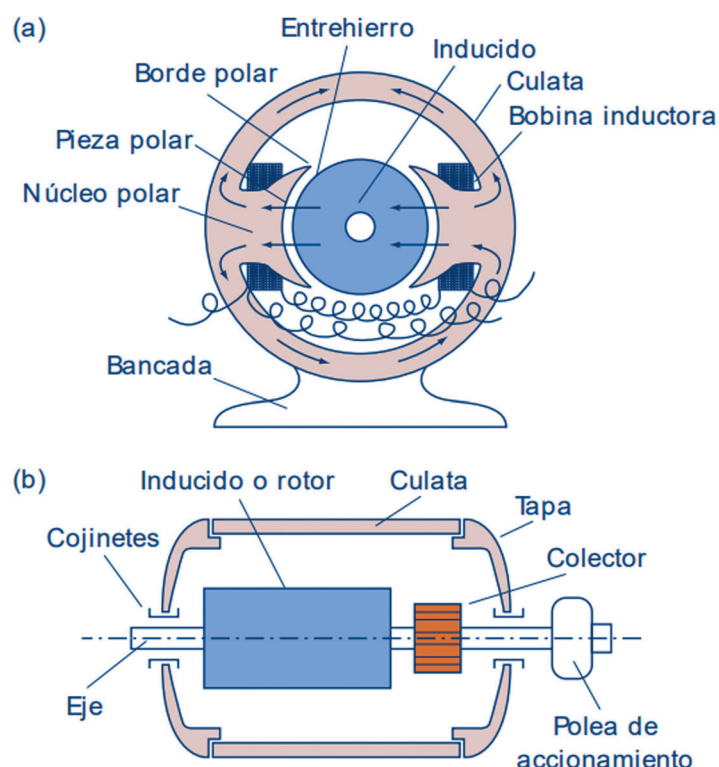
Según Gómez (2020), la Ley de Laplace explica la manera en que la fuerza experimenta una corriente eléctrica (I), que circula por un conductor de longitud L , la cual se encuentra inmersa en un campo magnético; esta ley se expresa según la siguiente fórmula matemática:

$$\vec{F} = L \cdot (\vec{I} \times \vec{B}) = L \cdot I \cdot B \cdot \sin \alpha$$

1.3. Elementos de una máquina rotativa eléctrica

Las máquinas eléctricas rotativas constan de dos partes principales: el estator, correspondiente con la parte estática, y el rotor, correspondiente con la parte móvil de la máquina.

Figura 6 Elementos de una máquina rotativa eléctrica

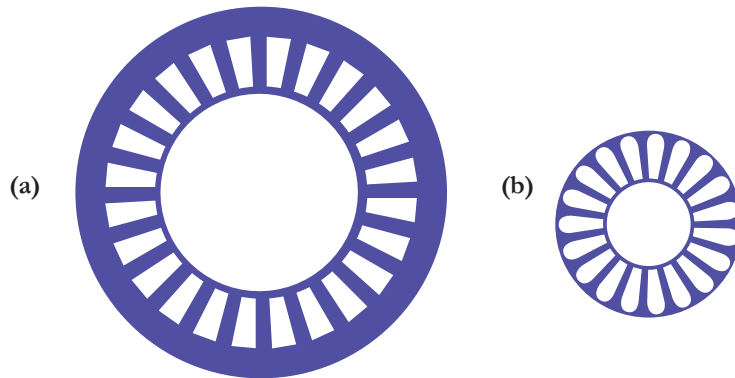


Nota. Tomado de Martínez, 2019.

El estator se encuentra conformado por una carcasa de acero o acero fundido, que tiene patas soldadas y un agujero central en el que encaja un núcleo ferromagnético, es decir, un conjunto de chapas ranuradas de bajo espesor apiladas, donde se aloja el bobinado que conforma el estatórico que entrega y recibe la energía eléctrica.

Por otra parte, el rotor se encuentra conformado una chapa magnética y un eje, en el que se encuentran los asientos de los rodamientos que permiten el movimiento de rotación; el rotor puede tener diseño de jaula de ardilla o bobinado, según su función y el tipo de máquina (Gómez, pp. 10 y 11); así mismo, el rotor cuenta con un colector, el cual se encuentra conformado por delgas de cobre aisladas entre sí y sobre las que se deslizan las escobillas (Martínez, p. 245).

El núcleo de la chapa magnética consta de una serie de placas finas ranuradas, normalmente de 0,5 mm, sobre las que se colocan las bobinas que componen el devanado del motor. Estas placas se apilan, aisladas unas de otras, hasta alcanzar la longitud correcta del núcleo.

Figura 7 Chapa magnética del estator (a) y del rotor (b)

Nota. Tomado de Gómez, 2020.

Dependiendo de la función de la máquina, las partes pueden servir como inductor o como inducido; en el caso del inductor, es la parte de la máquina que produce y conduce el flujo magnético, y consta de un devanado inductor para producir el flujo magnético cuando la corriente eléctrica esté circulando; por su parte, el inducido cuenta con un devanado inducido, en el que se produce la transformación energética y que se conecta al circuito externo (Martínez, pp. 244 y 245). Es así que, para Gómez (2020), el inductor tiene una función de causalidad correspondiente con la creación del campo magnético; mientras que el inducido recibe los efectos del proceso, es decir, la acción del campo magnético.

Como se mencionó líneas más arriba, las máquinas eléctricas rotativas cuentan con un entrehierro que permite el acoplamiento de las energías eléctrica y mecánica a causa de los fenómenos electromagnéticos; el entrehierro se encuentra entre el diámetro menor del núcleo ferromagnético del estator y el diámetro mayor del rotor (Gómez, 2020, p. 12). Al colocarse entre el rotor y las expansiones polares, el entrehierro evita que se genere rozamiento por el movimiento (Martínez, p. 245).

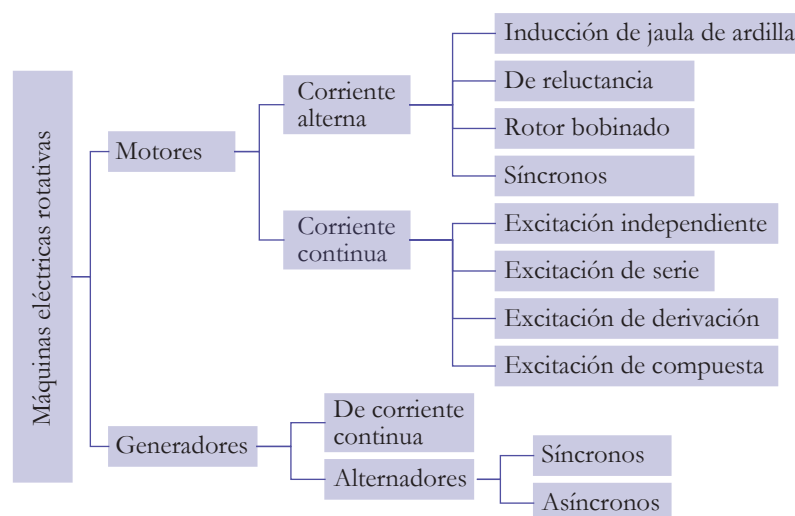
También poseen escudos o soportes, los cuales se ubican en los extremos de la carcasa, y cuya función es la de alojar a los rodamientos del motor y conservar el centro geométrico entre el eje y el estator; los escudos se pueden clasificar en lado del accionamiento (LA) o *drive end* (DE), y lado contrario al accionamiento (LOA) o *non drive end* (NDE) (Gómez, 2020, p. 12).

Además, posee una caja de bornes, en la que se alojan los cables de entrada y salida del estator, los cuales se conectan a un bornero o placa de bornes (Gómez, 2020, p. 13). Así mismo, cuenta con escobillas de carbón o grafito que se unen a los bornes y se deslizan sobre las delgas (Martínez, 2020, p. 245).

1.4. Clasificación de las máquinas rotativas eléctricas

Si bien existen diferentes tipos de clasificaciones de las máquinas eléctricas rotativas, el criterio más común es el que las clasifica según su relación con el campo magnético; es decir, si se trata de un inductor, que crea el campo magnético, o de un inducido, que recibe la acción del campo magnético (Gómez, 2020, p. 13).

Figura 8 *Clasificación de máquinas eléctricas rotativas*



Nota. Tomado de Gómez, 2020.

1.4.1. Motores

Se trata de motores de corriente alterna (AC) o corriente continua (CC) cuando el estator es inductor y el rotor es inducido (Gómez, 2020, p. 14). De acuerdo con Chapman (2000), los motores se caracterizan por ser dispositivos que transforman la energía eléctrica en mecánica, lo que permite realizar el trabajo y su aplicación poder ser variada, pues permite accionar diferentes electrodomésticos en el hogar o maquinarias más complejas y sofisticadas en el trabajo (p. 1).

1.4.2. Generadores

Se trata de generadores de corriente continua o alternadores (generadores de corriente alterna) cuando el estator es inducido y cuando el rotor es inductor (Gómez, 2020, p. 14). Por su parte, los generadores son importantes, ya que permiten que se les suministre energía a los mencionados motores; estos dispositivos son capaces de transformar la energía calorífica y mecánica en energía eléctrica que es transmitida hasta los sitios más lejanos (Chapman, 2000, p. 1).

1.5. Clasificación de los motores

1.5.1. Motores de corriente alterna

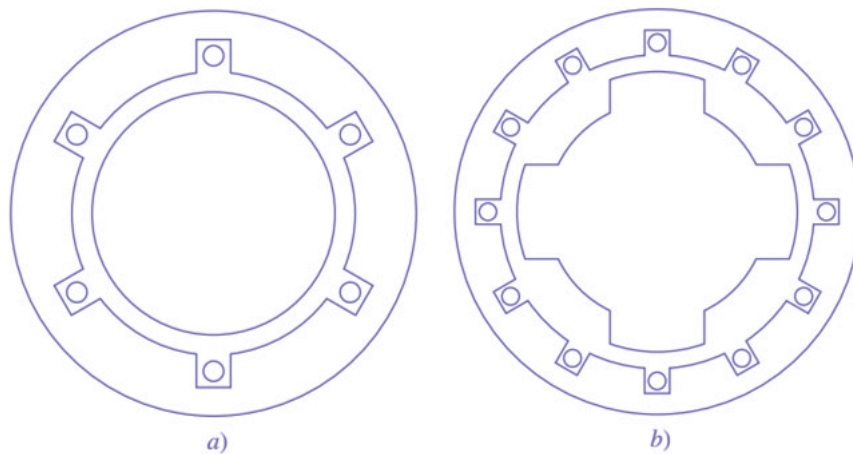
Los motores CA se componen por un estator con una carcasa de fundición y un núcleo de chapas magnéticas apiladas y troqueladas, las cuales contienen las bobinas con las que se forma el circuito, y por un rotor con un núcleo de chapas magnéticas ajustado sobre el eje (Manzano, 2010, p. 163). Estos motores se caracterizan por tener, en su mayoría, sus circuitos de campo en los rotores, los cuales pueden ser cilíndricos y de polos no salientes o de polos salientes; estos se pueden clasificar en motores sincrónicos, cuya fuente de potencia CA es externa, y los motores de inducción, cuyo campo magnético suministra a los devanados de campo a partir de la acción transformadora de la inducción magnética (Chapman, 2000, p. 119).

La eficiencia de un motor CA se puede calcular a partir de su potencia de entrada y de salida, teniendo en cuenta las pérdidas, conforme a la siguiente fórmula:

$$\eta = \frac{P_{entr} - P_{perd}}{P_{entr}} \times 100 \% = \frac{P_{sal}}{P_{entr}} \times 100 \%$$

El circuito en el rotor puede ser de tipo jaula de ardilla, con una base de anillos y barras de aluminio fundido o de bobinados con terminaciones anilladas y escobillas; así mismo, la rueda de chapas aloja polos magnéticos que pueden ser salientes, comunes en máquinas hidráulicas, o lisos, comunes en máquinas termonucleares (Manzano, 2010). En el caso de los motores con rotor cilíndrico (con polos lisos), la reluctancia es mayor en el entrehierro que en el rotor y el estator, por lo que en este caso la densidad de flujo atraviesa el entrehierro y varía de manera senoidal al igual que la fuerza magnetomotriz (Chapman, 2000, p. 132).

Figura 9 Motor CA con rotor cilíndrico (a) y con rotor de polos salientes (b)



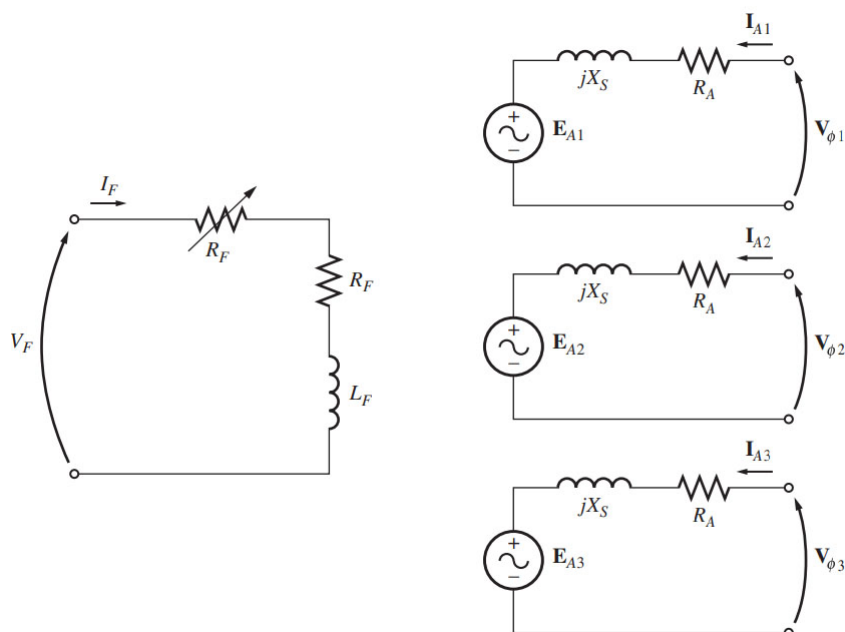
Nota. Tomado de Chapman, 2000.

Los motores síncronos o sincrónicos presentan una operación básica, en la que el rotor persigue al campo magnético giratorio del estator; la velocidad del rotor (n_m) motor sincrónico puede ser calculada de la misma manera que la del generador equivalente (Chapman, 2000), es decir, se considera la frecuencia eléctrica en Hz (f_e) y el número de polos (P), según la siguiente expresión:

$$f_e = \frac{n_m P}{120}$$

Dado que trata de una máquina con un régimen inverso al del alternador, se le aplica CA al estator y CC al rotor, y genera fuerzas que hacen que la máquina gire a una velocidad constante o sincrónica (Manzano, 2010, p. 228). El circuito equivalente del motor síncrono presenta en cada fase el mismo proceso; el campo magnético giratorio produce un voltaje interno generado (E_A), el cual produce un flujo de corriente en el rotor (I), así como produce su propio campo magnético y su propio voltaje, como se muestra en el siguiente circuito (Chapman, 2000):

Figura 10 Circuito equivalente de un motor síncrono



Nota. Tomado de Chapman, 2000.

En este circuito, el voltaje se puede calcular, según la siguiente fórmula, conforme a la ley de voltaje de Kirchhoff:

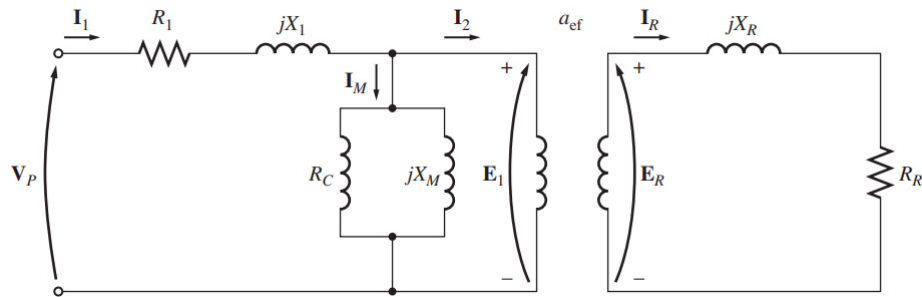
$$V_{\phi} = E_A + jX_S I_A + R_A I_A$$

$$E_A = V_{\phi} - jX_S I_A - R_A I_A$$

Por otra parte, los motores de inducción pueden presentar rotores de jaula de ardilla o rotores devanados. En este caso, el motor funciona a partir de una inducción de voltajes en el rotor, por lo que también se le puede conocer como “transformador rotatorio”; el voltaje inducido en la barra del rotor se identifica como movimiento relativo del rotor en comparación con el campo magnético del estator. Si es inducido en las barras superiores, se va hacia el exterior, pero si se le induce a las inferiores, se va hacia el interior.

Así mismo, el circuito equivalente del motor de inducción presenta un modelo de transformador, puesto que la inducción de voltajes es una acción transformadora; de igual modo, se conoce a su circuito como circuito de excitación única, dado que la potencia solo se suministra en el estator, a causa de una carencia de fuentes de voltaje internas y a diferencia de los motores sincrónicos que son de doble excitación.

Figura 11 Circuito de modelo de transformador de un motor de inducción

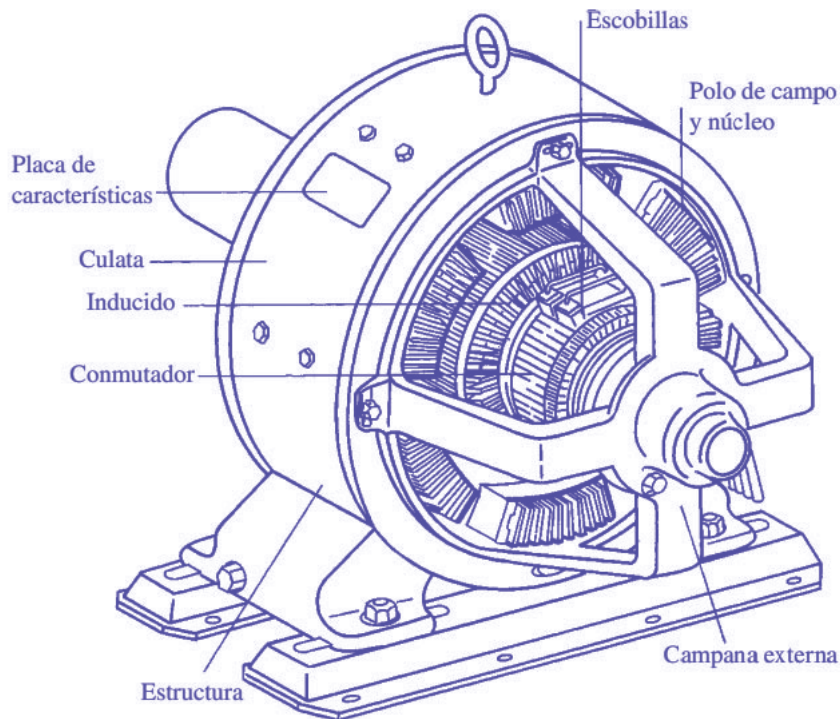


Nota. Tomado de Chapman, 2000.

1.5.2. Motores de corriente continua

De acuerdo con Chapman (2000), la principal característica de los motores CC es que poseen voltajes y corrientes CA, pero, además, presentan un mecanismo de salida CC llamado conmutador, que transforma los voltajes en sus terminales (p. 301). De igual forma, tienen la capacidad de revertirse, por lo que su constitución técnica permite que se le utilice también como generador o dinamo (Manzano, 2010, p. 90).

Figura 12 Diagrama de una máquina de CC

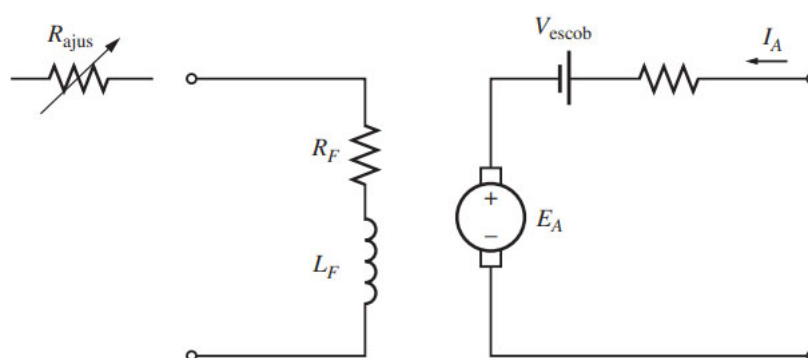


Nota. Tomado de Chapman, 2000.

De acuerdo con el BUN-CA (2011), parte de las ventajas de este tipo de motor es que posee una alta capacidad de regulación de la velocidad de rotación, por lo que se utilizan, comúnmente, para aplicaciones de precisión que requieren un ajuste exacto en la velocidad y el torque del motor (p. 6).

En este tipo de motor, el circuito equivalente del rotor posee una fuente de voltaje ideal (E_A) y un resistor (R_A); el voltaje cae sobre las escobillas (V_{escob}) en sentido opuesto a la dirección del flujo de corriente, y las bobinas de campo poseen un resistor (R_F) y un inductor (L_F); así mismo, se presenta un resistor variable externo (R_{ajus}) que controla la cantidad de corriente en el circuito de campo (Chapman, 2000, p. 346).

Figura 13 Circuito equivalente de un motor CC



Nota. Tomado de Chapman, 2000.

Es importante considerar que, en este tipo de motor, la caída del voltaje en las escobillas es un fragmento mínimo del voltaje que la máquina genera; el voltaje, generado por este motor, se puede expresar de la siguiente manera:

$$E_A = K\phi\omega_m$$

1.5.3. Motores trifásicos

En la actualidad, es común que se utilicen motores con circuitos trifásicos a causa de que su potencia tiene más ventajas que los de potencia CA y CC en términos de constancia y de suministro por peso; así mismo, se caracterizan por facilitar el proceso de inducción al permitirle a estos motores que arranquen sin devanados de arranque auxiliares especiales (Chapman, 2000, p. 449).

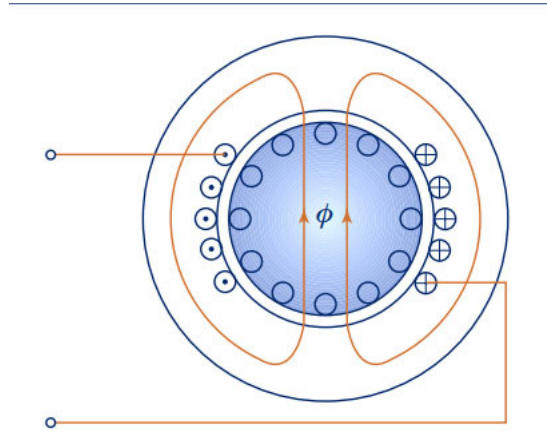
1.5.4. Motores monofásicos

Según Chapman (2000), los motores monofásicos son aquellos que se encuentran comúnmente en las pequeñas empresas o en las casas; estos se pueden clasificar en el motor universal y el motor de inducción monofásico.

Por su parte, Martínez (2019) sostiene que un motor tiene funcionamiento monofásico, cuando es capaz de continuar en funcionamiento, a pesar de que se desconecten las otras fases y que no

se produzca un campo giratorio; en este caso, el flujo alterno (ϕ) se origina por la aplicación de corriente alterna en el estator y produce corrientes en las barras del rotor (p. 274).

Figura 14 *Motor monofásico*



Nota. Tomado de Martínez, 2019.

El motor universal se caracteriza porque su relación torque-velocidad es la de mayor pendiente entre los motores CC en serie; así mismo, es compacto, brinda más torque por ampere que los motores monofásicos, por lo que se utiliza en casos en los que se necesiten motores ligeros, como herramientas y electrodomésticos portátiles (Chapman, 2000); este motor es similar al de CC serie en materia de conexión y construcción, mas presenta algunas modificaciones que le permiten funcionar correctamente con CA (Martínez, 2019, p. 275).

Por otra parte, los motores de inducción monofásicos suelen ser un poco más limitados, dado que no posee torque de arranque, como consecuencia de que la presencia de una sola fase en el devanado del estator genera que este oscile en lugar de girar (Chapman, 2000).

CAPÍTULO II

MOTORES DE INDUCCIÓN O ASÍNCRONOS

Del mismo modo que con el motor CC, el motor de inducción desarrolla torque a partir de la interacción de las corrientes axiales del rotor y el campo magnético producido por el estator; sin embargo, en este caso, el motor no trabaja para producir corriente, sino que la corriente es inducida a partir de la acción electromagnética (Hughes, 2006, p. 167).

2.1. Definición

De acuerdo con Chapman (2000), se conoce como motor de inducción a todo aquel que posee tan solo un conjunto continuo de devanados de amortiguamiento, con los cuales se induce el voltaje en el rotor; estos motores son más frecuentes que los generadores de inducción y no requieren una corriente de campo CC para funcionar (p. 231).

Estas máquinas son rotativas, es decir, su velocidad de campo magnético giratorio es diferente de 0 (Fraile, 2003, p. 149); por lo cual se le puede expresar con la siguiente fórmula:

$$f_1 \neq 0 ; f_2 = f_1 \pm \frac{np}{60} ; f_2 = f_1$$

2.2. Elementos constitutivos

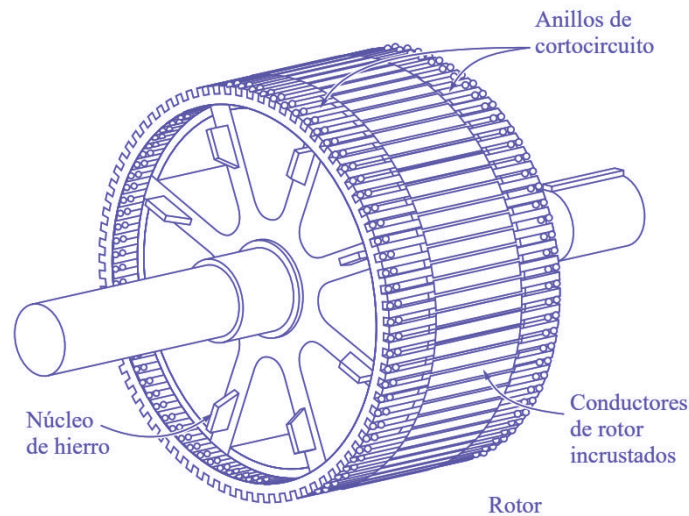
2.2.1. Estator

El estator cuenta con un devanado inductor, el cual se encuentra constituido por tres arrollamientos desfasados en el espacio en 120° , y por $2p$ polos; a través del devanado inductor se introduce una CA con frecuencia f_1 (Fraile, 2003, p. 264).

2.2.2. Rotor

Como señala Chapman (2000), los rotores de los motores de inducción pueden ser de jaula de ardilla, con un conjunto de barras conductoras en ranuras labradas y anillos de cortocircuito, o devanador, con un conjunto de devanados trifásicos que están conectados en Y y que se encuentran en cortocircuito a causa del roce de las escobillas (p. 232).

Figura 15 Diagrama de un rotor de jaula de ardilla

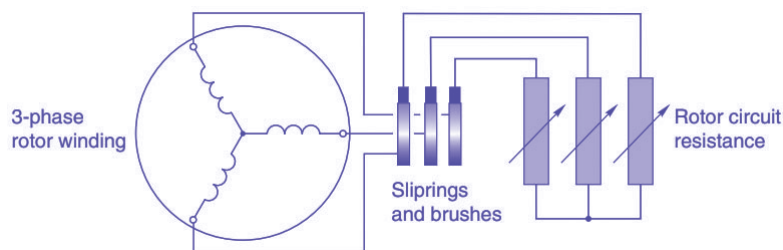


Nota. Tomado de Chapman, 2000.

El rotor de jaula de ardilla es el más común; cada una de sus ranuras contiene una barra conductora sólida y todos los conductores están física y eléctricamente unidos en cada extremo del rotor; así mismo, la ausencia de medio alguno para hacer una conexión eléctrica directa al rotor, evidencia el hecho de que las corrientes son inducidas por la soldadura del entrehierro; la presencia constante de barras conductoras cortocircuitadas es un reflejo de la imposibilidad de ejercer un control externo sobre la resistencia del circuito del rotor (Hughes, 2006, p. 184). El diseño se conoce de esta manera a causa de que los conductores, por sí mismos, emulan una rueda de hámsteres o ardillas para hacer ejercicio (Chapman, 2000, p. 231).

Por otra parte, el rotor devanador presenta unas ranuras que alojan un conjunto de devanados trifásicos similares a los del estator, los cuales están conectados en estrella con los extremos conectados a tres anillos rozantes; en este caso, el circuito está abierto y la conexión se puede realizar mediante escobillas que se apoyan en los anillos colectores (Hughes, 2006, p. 184). En consecuencia, los rotores devanados poseen corrientes accesibles a las escobillas del estator en el rotor, por lo que es posible que se incremente la resistencia en cada fase del circuito (Chapman, 2000, p. 234).

Figura 16 Diagrama de un rotor devanado



Nota. Tomado de Hughes, 2006.

De acuerdo con Hughes (2006), el comportamiento del rotor varía ampliamente de acuerdo con el deslizamiento, por lo que es relevante observar de manera separada a los valores de deslizamiento altos y bajos.

2.3. Principio de funcionamiento

Según Fraile (2003), cuando se introduce corriente de una red trifásica de frecuencia f_1 por los arrollamientos del estator, una onda rotativa de fuerza magnetomotriz se produce y distribuye de forma senoidal alrededor de la periferia del entrehierro, y, en consecuencia, produce un flujo giratorio con una velocidad de sincronismo (n_1) que se puede expresar de la siguiente forma:

$$n_1 = \frac{60f_1}{p} \text{ rpm}$$

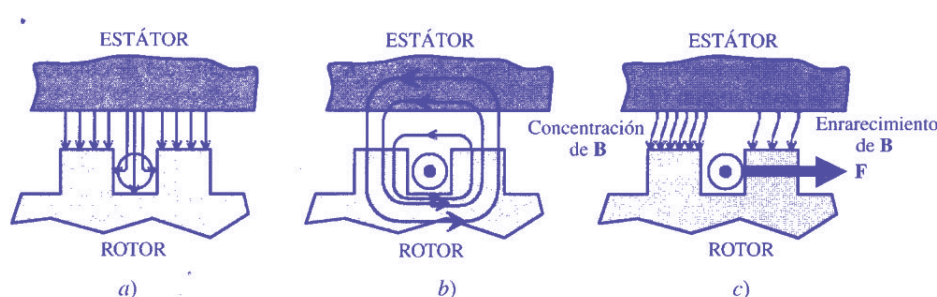
Posteriormente, afirma el autor, el flujo giratorio induce FEM en los conductores del rotor con longitud L a una velocidad v , cuyas corrientes reaccionarán con el flujo del estator si el circuito está cerrado; conforme a la Ley de Faraday este proceso se puede expresar de la siguiente manera:

$$e = \int (v \times B) dL = (v \times B) \cdot L$$

Luego, conforme a la Ley de Laplace, al circular la corriente por los conductores del rotor, surge una fuerza con el siguiente sentido:

$$F = i(L \times B)$$

Figura 17 Determinación del sentido de la fuerza en el conductor del rotor en una ranura



Nota. Tomado de Fraile, 2003.

Como se puede observar en la Figura 17, los conductores se encuentran en unas ranuras y existe menor reluctancia en los dientes, por lo que el campo B no atraviesa y la fuerza resulta ser nula; en la Figura 17.b se presentan las líneas de inducción producidas por el conductor que lleva corriente y, en la Figura 17.c, es posible observar la deformación de las líneas de inducción como resultado de ambos campos, con una fuerza que actúa sobre los dientes. Por lo que se afirma que, a mayor velocidad n_1 , menor la FEM inducida en los conductores del rotor y el par interno del motor (Fraile, 2003, pp. 266 y 267).

2.4. Torque de rotación

De acuerdo con la BUN-CA (2011), el torque se corresponde con la aplicación mecánica que se le dé al motor eléctrico; el torque puede ser de carga plena, si corresponde con el torque referencial necesario para producir potencia a la velocidad a carga plena, así mismo, el torque de arranque corresponde al que desarrolla el motor cuando arranca o deja la inercia, y el torque máximo es aquel que desarrolla el motor y que se expresa como un porcentaje mayor al del torque de carga plena (p. 13). De esta manera, el torque máximo se presenta cuando la potencia en el entrehierro es máxima, considerando un deslizamiento máximo ($s_{\text{máx}}$) y la resistencia del rotor (R_2) (Chapman, 2000, p. 254); el torque máximo se puede expresar de la siguiente manera:

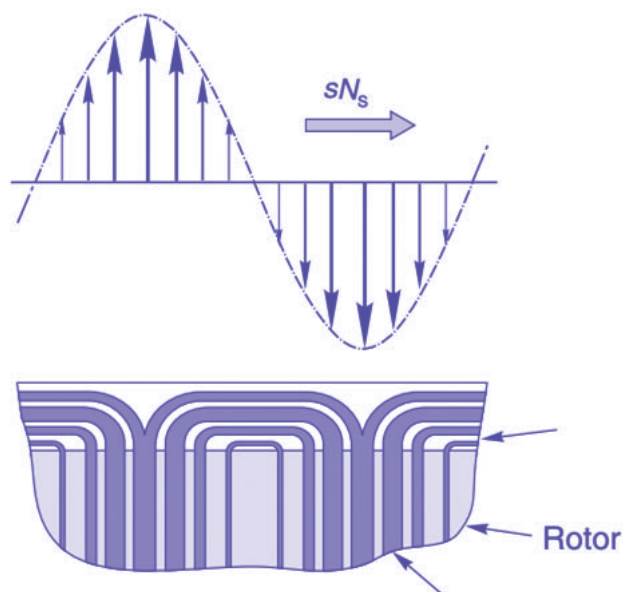
$$t_{\text{máx}} = \frac{3V_{TH}^2}{2\omega_{\text{sinc}} \left[R_{TH} + \sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2} \right]}$$

La velocidad a la que el flujo corta los conductores del rotor y su FEM inducida son directamente proporcionales al deslizamiento; no hay FEM inducida cuando la velocidad es síncrona ($s = 0$) y se presenta una FEM inducida máxima cuando el rotor está estacionario ($s = 1$). Además, la frecuencia (f_e) de la FEM del rotor es directamente proporcional al deslizamiento, dado que el rotor se desliza efectivamente con respecto a la onda de flujo, y cuanto mayor sea la velocidad relativa, más veces en un segundo cada conductor del rotor es cortado por un polo N y un S (Hughes, 2006, p. 186). La velocidad de rotación del campo magnético se expresa de la siguiente manera:

$$n_{\text{sinc}} = \frac{120f_e}{P}$$

Según el autor, el patrón de los voltajes instantáneos en el rotor es una réplica de la densidad de flujo (B) y la onda de voltaje inducida por el rotor, por lo que se mueve en relación con el rotor a velocidad de deslizamiento (v); así mismo, dado que las barras conductoras del rotor se encuentran unidas a los anillos finales, el voltaje inducido dirigirá la corriente a lo largo de las barras conductoras, formando un circuito cerrado a través de los anillos, como se muestra a continuación:

Figura 18 *Determinación del sentido de la fuerza*



Nota. Adaptado de Hughes, 2006.

Chapman (2000), en efecto, afirma que el voltaje, inducido en la barra del rotor, es producido por el movimiento relativo del rotor frente al campo magnético del estator, por cuanto la relación de velocidad de las barras superiores con el campo magnético se direcciona hacia afuera de la página, y el inducido en las inferiores se dirige hacia adentro de la página. El voltaje inducido se expresa de la siguiente forma:

$$e_{ind} = (v \times B) \cdot l$$

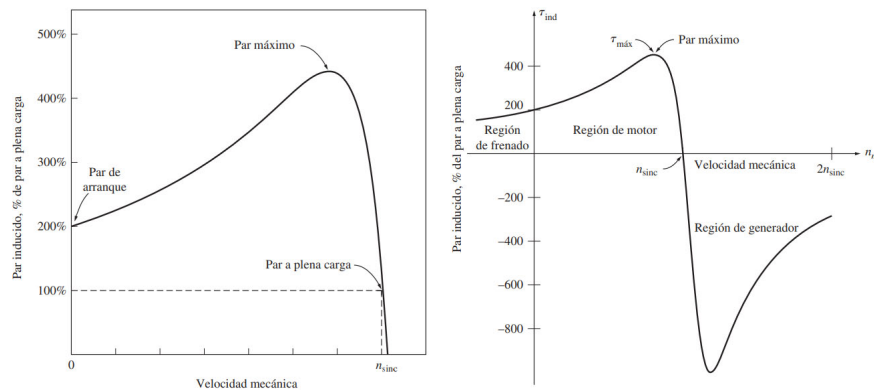
Dado que el flujo de corriente produce un campo magnético B_R que interactúa con el campo magnético del estator B_S , se presenta que el torque inducido en el motor se expresa con la siguiente ecuación:

$$t_{ind} = k B_R \times B_S$$

2.5. Curva característica del motor de inducción

De acuerdo con Chapman (2000), la curva característica torque-velocidad del motor de inducción entre el vacío y la carga plena es lineal, dado que la resistencia es mayor que la reactancia en el intervalo mencionado, por que la corriente en el rotor, el campo magnético y el torque inducido aumentan en forma lineal, según el incremento del deslizamiento, tal como se describe en la siguiente figura:

Figura 19 Curva característica torque-velocidad de un motor de inducción típico y con intervalos extendidos



Nota. Tomado de Chapman, 2000.

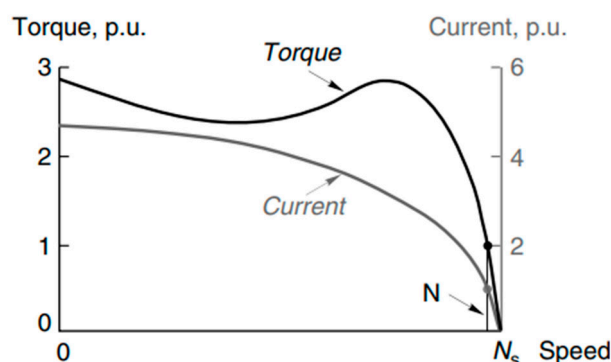
Como se puede observar en la Figura 19, se presenta un torque máximo de desviación, que no se puede exceder y que constituye el doble o triple del torque nominal a carga plena; así mismo, el torque de arranque es un poco mayor que el torque a carga plena, lo cual permite que arranque con cualquier carga que alimente la potencia plena. También se evidencia que, si se presenta un deslizamiento, el torque del motor variaría con el cuadrado del voltaje aplicado.

Por otra parte, si la rotación se da en sentido contrario a la dirección del campo magnético, el torque inducido se detendrá y se impulsará para que la rotación se invierta; esta acción se nombra como conmutar dos fases del estator y es utilizada para detener rápidamente el motor, a esta acción se le nombra frenado por contracorriente. (Chapman, 2000, p. 253).

De acuerdo con Hughes (2006), esta curva corresponde con el funcionamiento de un rotor de jaula simple, pero, en el caso de un rotor de doble jaula, las barras internas tienen una inductancia de fuga mayor, de modo que en condiciones de arranque su reactancia inductiva es muy alta y circula poca corriente; en cambio, los barrotes de la jaula exterior están colocados de forma que sus flujos de fuga muestran un camino de renuencia más alto, una inductancia de baja fuga y la corriente del rotor produce un alto torque de arranque al concentrarse en la jaula exterior; por otra parte, a una velocidad normal, la frecuencia del rotor es baja y la curva torque-velocidad es empinada y la eficiencia es alta. En comparación con un rotor de jaula simple, la jaula doble proporciona un par de arranque mucho mayor, menos corriente de arranque y peor funcionamiento/actuación.

En el caso de un rotor devanado, cuando la frecuencia del rotor es igual a la frecuencia de suministro, el efecto pelicular es muy pronunciado y la corriente del rotor se concentra hacia la parte superior de las ranuras; como se muestra a continuación:

Figura 20 *Curva característica torque-velocidad de un rotor devanado*



Nota. Tomado de Hughes, 2006.

Como se puede observar en la figura anterior, la resistencia efectiva aumenta, lo que da como resultado un torque de arranque alto a partir de una corriente de arranque baja; cuando la velocidad aumenta y la frecuencia del rotor cae, la resistencia efectiva se reduce hacia su corriente continua y la corriente se distribuye de forma uniforme mediante la sección transversal de las barras. Entonces, se concluye que el rendimiento es similar al de un rotor de jaula simple de baja resistencia, lo que brinda una alta eficiencia y una curva de par-velocidad rígida; pero el torque de extracción es algo menor que el de un motor equivalente de una sola jaula, debido a la reactancia de fuga bastante mayor (Hughes, 2006, p. 215).

2.6. Tipos de carga

De la Torre (2019) define carga al elemento utilizado por el motor para generar el movimiento rotatorio, ella se conecta al motor y genera torque; la carga puede ser constante o variable con la velocidad (p. 10). La carga de un motor puede variar de potencia, según el ciclo de trabajo al que el motor es sometido; el perfil de esta variación puede permanecer por diferentes medidas de tiempo, según su proceso y se debe monitorear (BUN-CA, 2011, p. 17).

La carga constante o de torque constante es aquella cuyo torque de resistencia no varía con la velocidad, dado que cuando la velocidad aumenta, el torque mecánico del motor es mayor al torque de carga, y cuando se regresa a la velocidad de operación, ambos torques son iguales (De la Torre, 2019). Este tipo de carga exige que el torque sea constante en todo rango de velocidad (BUN-CA, 2011, p. 17).

La carga variable con la velocidad o de torque variable es aquella cuyas exigencias de torque varían durante el ciclo de trabajo (BUN-CA, 2011, p. 17). Como señala De la Torre (2019), estas cargas suelen utilizarse en motores relacionados al movimiento de fluidos, como pueden ser las centrífugas o las hélices, por lo que el toque de carga aumenta con la velocidad a causa de la fricción con el fluido (p. 13).

Algunos otros tipos de carga, según la BUN-CA (2011), pueden ser las de potencia constante, cuya potencia máxima se mantiene sin importar la velocidad y se suelen utilizar en hiladoras, bobinadoras y troqueladoras; las de velocidad y torque constantes, que suelen ser utilizadas en

escaleras mecánicas o transportadoras de cadenas; o las de velocidad y torque variables, cuya aplicación alcanza un alto potencial de ahorro de energía si se les aplica un convertidor de frecuencia variable.

2.7. Arranque

Se define por arranque al procedimiento mediante el cual se lleva al motor desde un punto de velocidad cero, hasta un punto en el que la velocidad para el funcionamiento del motor en cuestión sea estable y resista la carga que tiene que poner en movimiento. Dicho esto, cabe resaltar que existe una condición para que se lleve a cabo el arranque, el cual consiste en que el par resistente del motor debe ser inferior al par del motor; de no cumplirse esta condición, no habrá la fuerza necesaria para soportar la carga que posee y, por ende, no se producirá el arranque (Rodríguez, 2017, p. 1).

Para calcular la corriente de arranque en un motor de inducción, se deben considerar los caballos de fuerza y el voltaje nominal, como se muestra a continuación:

$$S_{\text{arranque}} = (\text{caballaje nominal})(\text{factor de letra de código})$$

$$I_L = \frac{S_{\text{arranque}}}{\sqrt{3}V_T}$$

2.7.1. Arranque directo

Para motores no tan grandes (menos de 5 kW de potencia), no suele ser necesario utilizar un arrancador en particular, pero se puede arrancar el motor conectándolo directamente a la red. En un primero momento, el motor consumirá una corriente mayor durante unos segundos, aumentará de forma gradual su velocidad y disminuirá de la misma manera la corriente que consume, hasta que se estabilice en su punto de funcionamiento; debido a esto, una característica de este movimiento es su brusquedad y violencia (De la Torre, 2019, p. 16). En este método de arranque, basta con una corriente del rotor reducida al estator (I'_{2a}), por lo que se considera que es prácticamente igual a la corriente de arranque (I_a) (Rodríguez 2017, p. 2); ello se puede expresar de la siguiente forma:

$$I_a \approx I'_{2a} = \frac{V_{1N}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{1}\right)^2 + X_{cc}^2}}$$

$$I_a = \frac{V_{1N}}{\sqrt{R_{cc}^2 + X_{cc}^2}}$$

2.7.2. Arranque estrella-triángulo

El arranque estrella-triángulo es un método de arranque con tensión reducida que se utiliza cuando el motor está conectado a una red eléctrica cuya tensión es equivalente a la asignada en el motor (Rodríguez, 2017, p. 7). Este tipo de arranque es muy particular, debido a que se debe arrancar el motor conectado en estrella y, luego de un tiempo, generalmente segundos, conectarlo de inmediato en triángulo; esta figura que se forma y se conecta, vendría a ser el bobinado trifásico del estator (De la Torre, 2019, p. 17).

Hay motores que poseen mucha potencia, por ello, de ahí se desprende que tienen corrientes y, por ende, tiempos de arranque mayores; debido al efecto Joule, el cual está relacionado con la temperatura, hace que la misma se incremente, es por ello que se debe aplicar un arranque en particular para alivianar las corrientes de arranque (De la Torre, 2019, p. 16).

2.7.3. Arranque suave

A diferencia de los anteriores, en este caso, señala el autor, se hace uso de un dispositivo electrónico, que regula algunos parámetros como la tensión con la que se alimenta el motor.

Al inicio de este proceso, la tensión en el arranque es menor, debido a eso, la corriente y el torque también, ya que se da de manera progresiva. Esta forma evita que la corriente en el arranque sea elevada y se tenga un arranque suave, pero todo esto resulta un poco más costoso que los anteriores.

2.8. Potencia

Llamamos potencia a la capacidad para producir energía por una unidad de tiempo determinada que puede presentar una máquina eléctrica.

2.8.1. Tipos de potencia

Conforme al proceso de transformación de energía, que caracteriza a estos motores, se puede clasificar la potencia en potencia de entrada y potencia mecánica desarrollada; mientras que, conforme a la demanda de la máquina eléctrica, se puede tipificar a la potencia como potencia aparente (S), potencia activa (P), pues genera trabajo útil, y potencia reactiva (Q), pues crea un campo magnético.

Según Chapman (2000), se conoce como potencia de entrada a la potencia en el entrehierro, considerando las pérdidas del núcleo y las pérdidas en el cobre del estator y del rotor, así como que el único elemento que puede consumir potencia en el entrehierro es el resistor ($R_2 I_s$). La potencia en el entrehierro del motor de inducción se puede calcular de la siguiente manera:

$$P_{EH} = P_{entr} - 3E_1^2 R_1 - 3E_1^2 G_c$$

$$P_{EH} = 3I_2^2 \frac{R_2}{s}$$

Siguiendo la misma línea del autor, se conoce como potencia mecánica desarrollada a la potencia restante tras las pérdidas y es transformada de eléctrica a mecánica. Esta potencia se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} P_{conv} &= 3I_2^2 \frac{R_2}{s} - 3I_2^2 R_2 \\ &= 3I_2^2 R_2 \left(\frac{1}{s} - 1 \right) \\ P_{conv} &= 3I_2^2 R_2 \left(\frac{1-s}{s} \right) \end{aligned}$$

Por otro lado, la potencia aparente (S) es aquella que considera la tensión aplicada al consumo de la corriente demandada (Renzetti, 2008, p. 2); según Corvalán (2021), esta potencia se expresa en voltios por amperes [VA], dado el voltaje (U) y la intensidad (I) de la corriente:

$$S = U \cdot I$$

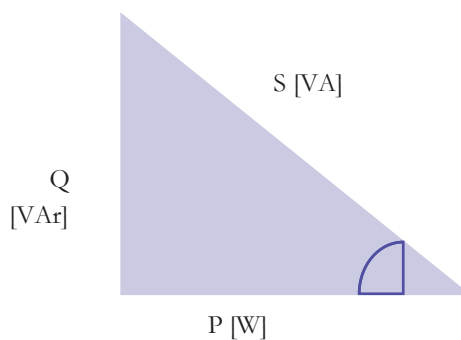
De acuerdo con el autor, se entiende como potencia activa (P) o real a aquella potencia útil que es consumida por el usuario y que es verdaderamente aprovechada en el eje del motor; según Corvalán (2021), esta potencia es mecánica y se expresa en watts [W], y se puede obtener cuando los vectores de la tensión y la corriente están girando a la misma velocidad, es decir, que están en reposo relativo entre sí; para calcular esta potencia, se considera el ángulo (φ) formado por los mencionados vectores:

$$P = U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1$$

Finalmente, se conoce como potencia reactiva (Q) a aquella que los campos magnéticos intercambian durante la rotación con la red eléctrica, sin consumir la potencia activa; su unidad de medida es el Volt-Ampere reactivo [VAr] (Renzetti, 2008, p. 2). Este tipo de potencia se puede expresar de la siguiente forma:

$$Q = (S^2 - P^2)^{\frac{1}{2}}$$

Figura 21 Triángulo de potencia



Nota. Tomado de Renzetti, 2008.

2.8.2. Factor de potencia

Se define como factor de potencia ($\cos \phi$) al índice cualitativo y cuantitativo de la utilización de la energía, es decir, el porcentaje de la potencia utilizada en el trabajo, el cual se formula por el coseno del ángulo entre la potencia activa y la potencia total (Renzetti, 2008, p. 5). Como señala Corvalán (2021), existe una relación de las potencias activa o real y aparente, las cuales se expresan en el factor de potencia:

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{\text{Potencia activa}}{\text{Potencia aparente}}$$

$$FP = \frac{(U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \phi_1)}{(U \cdot I)} = \cos \phi_1$$

2.8.3. Problemas por bajo factor de potencia

Los problemas causados por un bajo factor de potencia pueden ser de carácter técnico o económico, dado que estos problemas se traducen en un consumo mayor de corriente, un incremento de las pérdidas en los conductores, la sobrecarga de transformadores, generadores y líneas de distribución, o el aumento de las caídas de voltaje. Dichos problemas pueden generar un aumento en la facturación por uso de energía eléctrica y el surgimiento de penalizaciones.

2.9. Temperatura

La temperatura es un factor interno eléctrico que interviene directamente en el funcionamiento del motor; las pérdidas por el efecto de Joule y la fuerza de fricción influyen en un incremento de la temperatura y son fuentes de calor, lo cual genera pérdidas eléctricas que se encuentran relacionadas con deficiencias en las condiciones de servicio del motor. Cuando un motor se encuentra operando a carga plena, se considera normal que las temperaturas oscilen entre los 40°C y 50°C.

2.10. Análisis de rendimiento

Según Quispe y Mantilla (2004), la eficiencia del motor se da en función de la medida de capacidad mecánica que tiene para la conversión de la energía eléctrica en mecánica, conforme a la siguiente fórmula:

$$EF\% = \frac{\text{Potencia Mecánica de Salida}}{\text{Potencia Eléctrica de Entrada}} \times 100$$

$$EF\% = \left(1 - \frac{\text{Pérdidas}}{\text{Pot. eléctrica de entrada}} \right) \times 100$$

De acuerdo con el Grupo de Gestión Eficiente de Energía (KAI), la relación entre la eficiencia (η) y el deslizamiento (s) en los motores, considerando a η_1 como la eficiencia del estator y a η_2 como la eficiencia del rotor, se expresa de la siguiente manera:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{P_{Elmagn}}{P_1} \right) \left(\frac{P_2}{P_{Elmagn}} \right) = \eta_1 \circ \eta_2$$

$$\eta_2 < \frac{P_{Elmagn} - \Delta Pe_2}{P_{Elmagn}} < \frac{1 - \Delta Pe_2}{P_{Elmagn}} < 1 - s$$

$$\eta < \eta_2 < (1 - s)$$

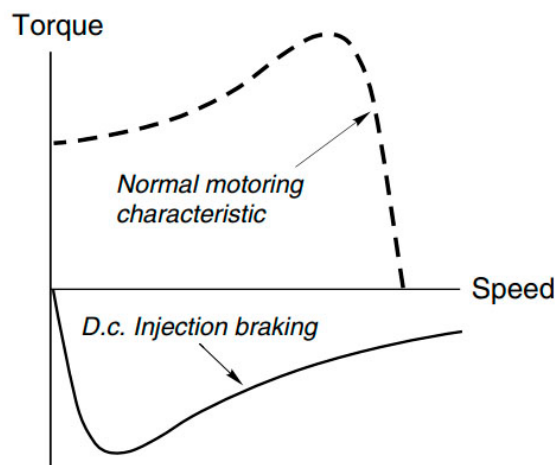
2.11. Variación de velocidad de motores de inducción

La velocidad de la rotación mecánica se puede expresar considerando la relación entre la frecuencia de alimentación (f_1), el deslizamiento (s), la rotación y el número de polos (p); ello conforme a la siguiente fórmula:

$$n = \frac{(120 \times f_1 \times (1 - s))}{p}$$

En un motor de inducción promedio, el intervalo de operación presenta un deslizamiento de menos del 5 % y su variación de velocidad es directamente proporcional a la carga en el eje; en este tipo de motor controlar la variación de velocidad no es tan sencillo como en otros, puesto que el deslizamiento es directamente proporcional a la pérdida en el cobre del rotor y un aumento en el mismo podría afectar la eficiencia de la máquina (Chapman, 2000, p. 272).

Figura 22 Triángulo de potencia



Nota. Tomado de Hughes, 2006.

De acuerdo con Hughes (2006), dos factores que determinan la velocidad de la soldadura son la frecuencia de alimentación y el número de polos; el número de polos es un número entero par, cuyo enfoque es proporcionar un suministro de frecuencia variable, ya que se requiere un control de velocidad continuamente ajustable en un amplio rango. Para algunas aplicaciones es suficiente,

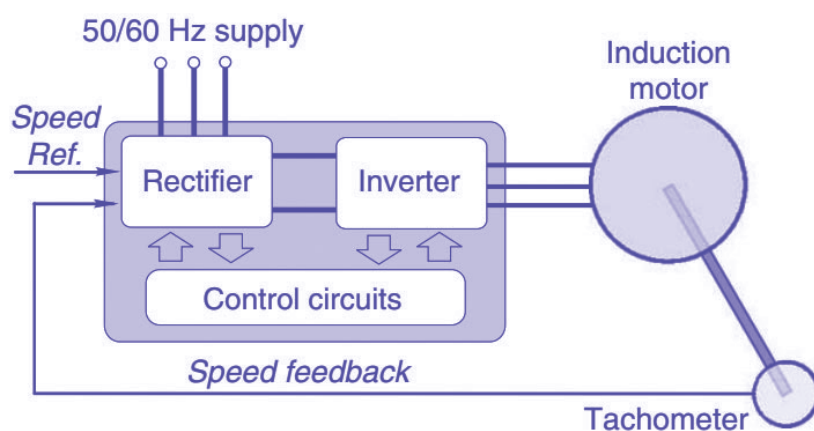
ya que se puede funcionar a dos velocidades discretas; si quisiéramos hacer un motor que pudiera funcionar a cualquiera de dos velocidades diferentes, podríamos construirlo con dos devanados de estator separados y energizar el adecuado, por lo que no hay necesidad de cambiar el rotor de la jaula, ya que el patrón de las corrientes inducidas puede adaptarse fácilmente al número de polos del estator (p. 222).

Como señala De la Torre (2019), una de las soluciones para regularizar la variación de la velocidad, que surge con el auge de la electrónica de potencia, es el dispositivo conocido como convertidor de frecuencia variable o variador de frecuencia (p. 22).

2.12. Convertidor de frecuencia variable

De acuerdo con Hughes (2006), la función del convertidor de frecuencia variable (CFV) es extraer energía de la red de voltaje constante de frecuencia fija y convertirla en voltaje variable de frecuencia variable para accionar el motor de inducción (p. 279). El CFV, variador de velocidad o inversor, es un equipo mecánico que convierte voltaje y frecuencia constantes en variables, a partir de los procesos de rectificación y conversión de la CA a CC y, posteriormente, de la inversión a CA con valores variables. El objetivo es mantener la relación voltaje-frecuencia en un valor fijo dentro del rango de velocidades, la variación de voltaje-frecuencia es proporcional, dado que un cambio en esta relación puede generar un impacto en el torque, la temperatura o el ruido (BUN-CA, 2011, p. 29).

Figura 23 Componentes principales de un convertidor de frecuencia variable



Nota. Tomado de Hughes, 2006.

El CFV se encuentra compuesto por un rectificador de CC y un inversor de voltaje; tanto el rectificador como el inversor emplean estrategias de conmutación, por lo que las conversiones de energía se logran de manera eficiente y el convertidor puede ser compacto (Hughes, 2006, p. 279). En el rectificador se convierte el voltaje CA en CC, y en el inversor, el voltaje CC se invierte para retomar su forma CA mediante rectificadores de silicio o transistores de potencia con frecuencia y voltaje variables (BUN-CA, 2011, p. 30).

Los motores de inducción alimentados por CFV se utilizan en clasificaciones de hasta cientos de kilovatios; los motores estándar de 50 Hz o 60 Hz lo utilizan a menudo y su frecuencia de salida generalmente cubre el rango de alrededor 5-10 Hz o hasta 120 Hz. Si bien la mayoría

de los inversores son de entrada trifásica y salida trifásica, las versiones de entrada monofásica están disponibles hasta aproximadamente 5 kW, y algunos más pequeños generalmente cubren un rango de menos de 1 kW (Hughes, 2006, p. 279).

2.13. Motores eléctricos de alta eficiencia

Para incrementar la eficiencia de los motores de inducción, es necesario que se reduzcan las pérdidas hasta en un 50 %, optimizando su uso de materiales y proceso de fabricación, pues ello aumenta la potencia de salida, y, en consecuencia, la eficiencia nominal (Quispe y Mantilla, 2004, p. 5), tal como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 1 Reducción requerida en las pérdidas en los conductores para aumentar la eficiencia en un punto

HP	Eficiencia original	Eficiencia incrementada	Reducción en pérdidas
1	73	74	8
5	83	84	11
25	89	90	16
50	90.5	91.5	19
100	91.5	92.5	28
200	93	94	38

Nota. Tomado de Quispe y Mantilla, 2004.

De acuerdo con Verucchi *et al.* (2013), las tendencias en el diseño de motores de alta eficiencia a un bajo costo se caracterizan por presentar máquinas con menor temperatura, menor densidad de corriente en sus devanados, menor resistencia en el estator y el rotor, y un incremento en la vida útil de los devanados del motor (p. 105).

En resumen, las características principales en los diseños de los motores de alta eficiencia son que las pérdidas, en los conductores del estator y la resistencia del bobinado, se encuentran disminuidas. Las pérdidas en los conductores del rotor se encuentran reducidas e incrementan el material conductor; así mismo, las pérdidas en el núcleo magnético y la carga magnética se encuentran reducidas e incrementan la longitud de la estructura ferromagnética; las pérdidas por fricción, que generan calor y el volumen de aire que requieren, se reducen; y las pérdidas adicionales se reducen con el objetivo de optimizar el diseño del motor (Quispe y Matilla, 2004, p. 6).

Si bien se considera que el costo de adquisición de los motores de alta eficiencia es mayor, el periodo de recuperación de la inversión adicional y la reducción del consumo energético generan que el uso de estos motores sea muy redituable (Verucchi *et al.*, 2013, p. 106). El ahorro económico, resultante de la utilización de un motor de alta eficiencia para reemplazar motores sobredimensionados o como parte de instalaciones nuevas, se puede calcular considerando la potencia de la placa (HP), el porcentaje de carga del motor (L), el costo de la energía por KWh (C), el tiempo de funcionamiento del motor en h/a (T) y la eficiencia del motor estándar (E_A) y del motor de alta eficiencia (E_B) de la siguiente manera:

$$S = 0.746 \text{ HP } L \text{ C } T \left(\frac{100}{E_A} - \frac{100}{E_B} \right)$$

CAPÍTULO III

OPTIMIZACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN PARA EL AHORRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA

3.1. Objetivo

Optimizar el funcionamiento de un motor de inducción mediante un convertidor de frecuencia variable para un adecuado ahorro de energía eléctrica, en la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Nacional del Centro del Perú.

3.2. Objetivos específicos

- Determinar las características del funcionamiento del motor mediante el actuador $Y - \Delta$.
- Determinar las características de funcionamiento del motor de inducción mediante el control del convertidor de frecuencia variable.
- Realizar una comparación de valores con base en las características del funcionamiento del motor, mediante el actuador $Y - \Delta$, el funcionamiento del motor de inducción y el control con convertidor de frecuencia variable.
- Comprobar que, al reducir la corriente de arranque en el motor de inducción, se tiene un mejor rendimiento y un ahorro de energía.

3.3. Hipótesis

Existe una diferencia significativa de ahorro en el consumo de energía eléctrica, para el funcionamiento del motor de inducción, utilizando el dispositivo de arranque convertidor de frecuencia variable frente al dispositivo de arranque estrella triángulo en el laboratorio de la FIM UNCP.

3.4. Variables

En la presente investigación se estudiaron dos variables para cumplir con el objetivo general:

3.4.1. Variable independiente: funcionamiento del motor de inducción

El principio de funcionamiento de un motor de inducción consiste en la inducción de un campo magnético giratorio en el estator provocado en el rotor, lo que le da velocidad y torque.

3.4.2. Variable dependiente: ahorro de energía

El ahorro de energía consiste en reducir el uso de energía de un variador de velocidad, en comparación al caso del uso del variador a velocidad fija constante, es decir, desaparece el pico de energía al momento del arranque del motor.

3.4.3. Matriz operacional

Tabla 2 *Matriz operacional de la variable independiente: funcionamiento del motor de inducción*

Operacionalización de la variable independiente: funcionamiento del motor de inducción		
Definición operacional	Dimensiones	Indicador
El principio de funcionamiento de un motor de inducción consiste en la inducción de un campo magnético giratorio en el estator provocado en el rotor, lo que le da velocidad y torque.	- Corriente	Reducción de la corriente al inicio del arranque
	- Torque	Disminuir el torque a la partida del motor kWh

Tabla 3 *Matriz operacional de la variable dependiente: Ahorro de energía*

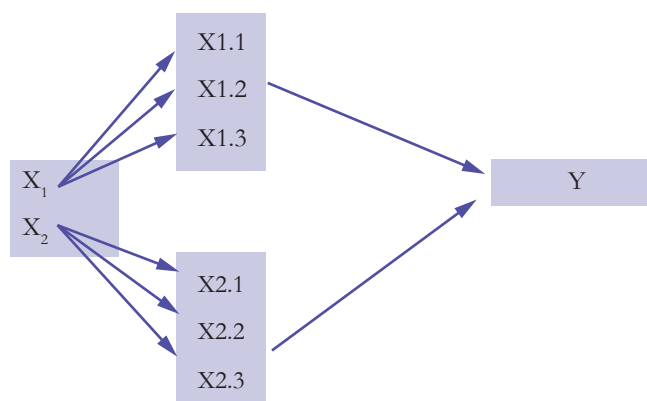
Operacionalización de la variable dependiente: ahorro de energía		
Definición operacional	Dimensiones	Indicador
El ahorro de energía consiste en la reducción del uso de energía de un variador de velocidad en comparación al caso del uso del variador a velocidad fija constante, es decir, desaparece el pico de energía, al momento del arranque del motor.	- Consumo de energía conexión estrella triangulo.	kWh
	- Consumo de energía conexión convertidor de frecuencia variable	kWh

3.5. Tipo de investigación

La presente investigación es de tipo aplicada, pues, de acuerdo con Lozada (2014), se busca aportar al conocimiento siempre con aplicación directa a la sociedad o a los sectores productivos. Así mismo, es una investigación de tipo tecnológico, pues su fin es el aprovechamiento y aplicación del conocimiento científico para resolver los problemas, en este caso, el rendimiento de los motores de inducción.

De igual manera, la investigación posee un diseño experimental, debido a que se manipula la variable independiente para conocer el efecto en la variable dependiente, es decir, se manipuló el funcionamiento del motor de inducción eléctrico para conocer el efecto en el ahorro de energía.

Figura 24 *Diseño de experimentación utilizado en la investigación*



En la Figura 24 se muestra el diseño de experimentación que se aplicó en la presente investigación, en el que:

- X1** : Arranque tipo estrella triángulo.
X2 : Arranque con convertidor de frecuencia variable.
X1.1.; X1.1; X1.3. : Frecuencia de 60, 50 y 40 Hz, respectivamente, para la variable independiente X1.
X2.1.; X2.1; X2.3. : Frecuencia de 60, 50 y 40 Hz, respectivamente, para la variable independiente X2.
Y : Consumo de energía

3.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

La técnica utilizada en la investigación fue la observación, la cual consiste en el registro sistemático, válido y confiable de comportamientos y situaciones observables (Hernández, Fernández y Baptista, 2014). El instrumento utilizado fue la guía de reporte de datos.

3.7. Unidad de estudio

La unidad de análisis se refiere al objeto, participantes o sucesos de estudio, también se denomina unidades de muestreo. En este caso, el motor de inducción del laboratorio de la Facultad de Ingeniería Mecánica, de la Universidad Nacional del Centro del Perú.

3.8. Técnicas de procesamiento y análisis de datos

Los datos obtenidos fueron tabulados en Microft Excel y se les aplicó estadística descriptiva para su posterior análisis. De igual manera, se utilizó el software estadístico SPSS V26 para el contraste de hipótesis.

3.9. Resultados

El consumo de energía dentro de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la UNCP es alto, debido al uso de equipos como tornos que disponen de motores de 2 HP y 5HP, compresoras con

motores de 2 Hp, esmeriles con motores de 2 Hp, máquinas de soldar, etc. Su operatividad abarca prácticamente la totalidad de la jornada laboral.

3.9.1. Ensayos experimentales

Para iniciar la investigación fue necesario conocer los parámetros de la máquina a evaluar, cuyos resultados se muestran en la tabla 4:

Tabla 4 *Diseño y datos de motor*

Conexión	Delta
Voltaje (V)	220/380
Corriente (A)	6.9
Potencia (HP, KW)	2/1.5
Velocidad (RPM)	1730
Frecuencia (Hz)	60
Factor potencia	0.9

3.9.2. Pruebas de funcionamiento y arranque del motor asíncrono

Se llevaron a cabo pruebas de funcionamiento del módulo, con el objetivo de conseguir un mayor rendimiento, rapidez en el control y mayor calidad de transmisión. Los resultados de tales pruebas se exponen a continuación:

a) Producción de energía

$$Eficiencia = \frac{Potencia\ mecánica}{Potencia\ eléctrica} \times 100$$

$$Eficiencia = \frac{2HP \times 0.746}{1.84\ kW} \times 100$$

$$Eficiencia = 80\%$$

Las horas de operación del equipo por día son 8 horas, por lo tanto:

$$Producción\ de\ energía = 1.472\ kW \times 8\ horas \times 0.80$$

$$Producción\ de\ energía = 9.4208\ kWh$$

Para una ventana de 5 años, en razón de 8 horas diarias de salida:

$$5\ años \times 252\ días \times 252\ días \times 9.4208 = 11870.208\ kWh$$

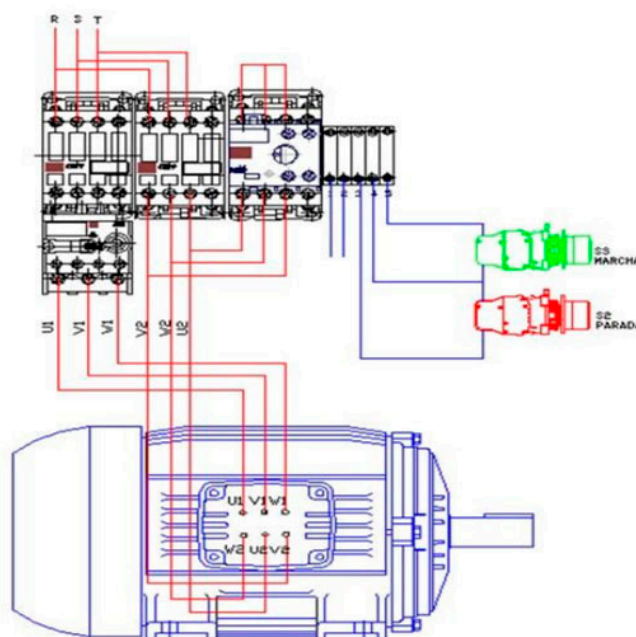
$$Total\ de\ producción\ de\ energía = 11870.208\ kWh$$

b) Arranque estrella triángulo

Cuando un motor de arranca necesita una corriente de, aproximadamente, seis veces mayor a la nominal, esto trae como consecuencias caídas fuertes en la tensión en la red. Para contrarrestar

este efecto, se utiliza el método del arrancador estrella-triángulo (delta), cuyo voltaje de los devanados es más bajo, y ya cuando el motor está rotando, es cambiada la conexión a triángulo (delta). En este último caso, los devanados quedan con la tensión nominal de trabajo. Al aplicar el método de arranque estrella-triángulo, disminuye el consumo de corriente. El tablero para este tipo de método se muestra en la Figura 25:

Figura 25 *Tablero de arranque Estrella Triangulo (Delta)*



Nota. Tomado de Kling, 2002, citado por Calcina, 2016.

Con este tipo de arranque se tomaron medidas de índice de consumo de energía en tres diferentes frecuencias. En la Tabla 5 se muestran los valores de amperaje y en la Tabla 6 se muestran las mediciones de consumo de energía para las diferentes frecuencias.

Figura 26 *Arranque estrella-triángulo*



Tabla 5 Amperajes de consumo en las fases (Amperios)

Operación del motor trifásico 2HP	Amperajes de consumo en las fases (Amperios)			Carga aplicada
	R	S	T	
Frecuencia 60 Hz				Valor determinado una sola vez
Estrella triángulo	2.8	2.6	2.7	
Con Convertidor de frecuencia variable	1.5	1.6	1.7	

Tabla 6 Medición de consumo de energía una hora

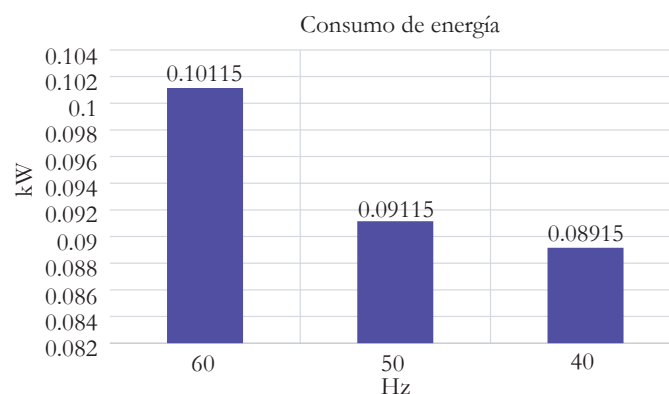
Consumo de energía del sistema arranque con estrella triángulo			
Modo de arranque	Frecuencia	Tiempo	Consumo de energía
Estrella triángulo	60 Hz	1 Hora	0.10115 kWh.
Estrella triángulo	50 Hz	1 Hora	0.09115 kWh.
Estrella triángulo	40 Hz	1 Hora	0.08915 kWh.

Figura 27 Pruebas de arranque estrella- triángulo



Los valores de consumo de energía mostrados en la Tabla 6 se graficaron como se aprecia en la figura 28. Para una frecuencia de 60 Hz, se requieren 0.10115 kW, mientras que, para una frecuencia de 40 Hz, se requieren 0.08915 Hz.

Figura 28 Medición de consumo de energía del sistema estrella-triángulo

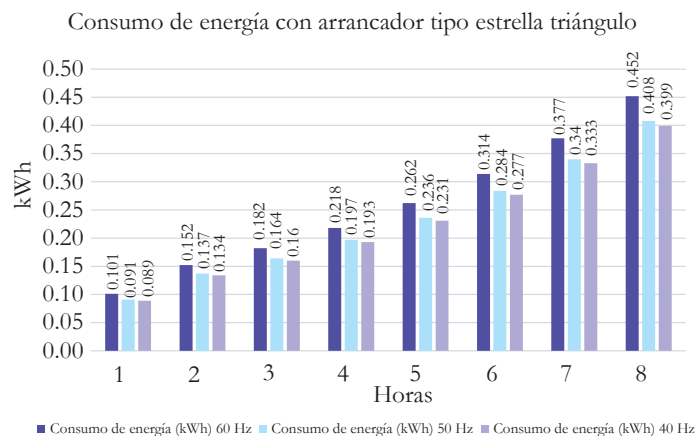


El consumo por 8 horas de trabajo continuo se muestra para cada frecuencia en la Tabla 6. En la Figura 28 están graficados estos datos para su mejor apreciación. Se observa que la diferencia de consumo de energía entre 50 y 40 Hz es bastante menor si se compara con la diferencia entre 60 y 50 Hz.

Tabla 7 Medición de consumo de energía por ocho horas de trabajo con arranque estrella-triángulo

Tiempo (horas)	Consumo de energía (kWh)		
	60 Hz	50 Hz	40 Hz
1	0.101	0.091	0.089
2	0.152	0.137	0.134
3	0.182	0.164	0.16
4	0.218	0.197	0.193
5	0.262	0.236	0.231
6	0.314	0.284	0.277
7	0.377	0.34	0.333
8	0.452	0.408	0.399

Figura 29 Medición de consumo de energía del sistema estrella-triángulo por ocho horas de trabajo continuo



c) Configuración del convertidor de frecuencia variable

El convertidor de frecuencia variable es un tablero electrónico que se maneja de forma digital, en él se programa, opera, monitorea y copian los parámetros del motor. Es común que ya vengan con su propio software instalado. Un ejemplo de este equipo se muestra en la Figura 30.

Figura 30 Convertidor de frecuencia variable



El ajuste del convertidor de frecuencia variable se realiza, como se muestra en la Figura 30.

Figura 31 Ajuste del convertidor de frecuencia variable

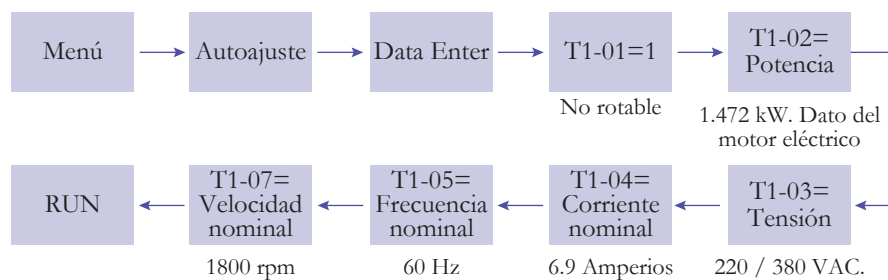


Figura 32 Pruebas de arranque con convertidor de frecuencia variable

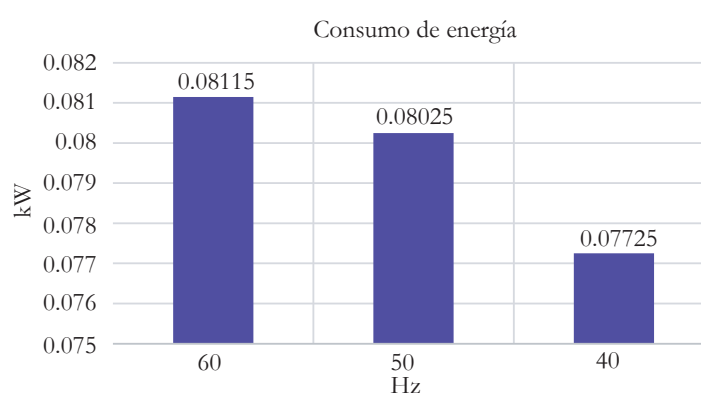


Con el ingreso de datos a este sistema de arranque convertidor de frecuencia variable, se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 8 y Figura 33:

Tabla 8 *Medición de consumo de energía con convertidor de frecuencia variable (una hora)*

Consumo de energía con el convertidor de frecuencia variable			
Modo de arranque	Frecuencia	Tiempo	Consumo de energía
Convertidor de frecuencia variable	60 Hz	1 hora	0.08115 kWh.
Convertidor de frecuencia variable	50 Hz	1 hora	0.08025 kWh.
Convertidor de frecuencia variable	40 Hz	1 hora	0.07725 kWh.

Figura 33 *Consumo de energía con convertidor de frecuencia variable una hora*



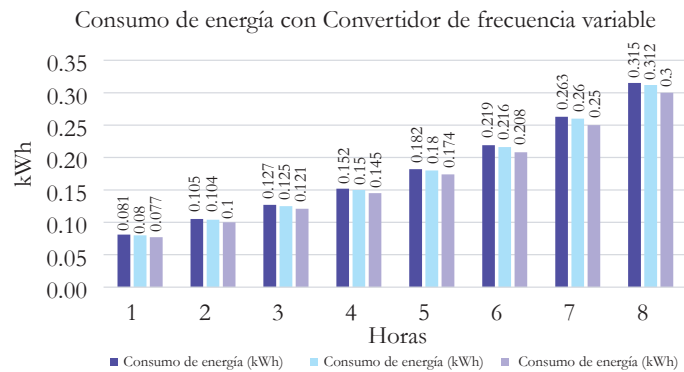
En la Figura 33 se aprecia una clara diferencia entre el consumo de energía entre 60 y 50 Hz, sin embargo, entre 50 y 40 Hz la caída en el consumo de energía es mayor.

El consumo por cada 8 horas de trabajo continuo, con el convertidor de frecuencia variable, se muestra para cada frecuencia en la Tabla 8, y en la Figura 33 están graficados estos datos para su mejor apreciación. Además, se observa que la diferencia de consumo de energía entre 50 y 40 Hz es bastante menor, si se compara con la diferencia entre 60 y 50 Hz.

Tabla 9 *Medición de consumo de energía por ocho horas de trabajo con convertidor de frecuencia variable*

Tiempo (horas)	Consumo de energía (kWh)		
	60 Hz	50 Hz	40 Hz
1	0.081	0.08	0.077
2	0.105	0.104	0.1
3	0.127	0.125	0.121
4	0.152	0.15	0.145
5	0.182	0.18	0.174
6	0.219	0.216	0.208
7	0.263	0.26	0.25
8	0.315	0.312	0.3

Figura 34 Medición de consumo de energía con convertidor de frecuencia variable por ocho horas de trabajo continuo



Los resultados mostrados en la Tabla 9, se evidencian también gráficamente en la Figura 34, y se aprecia que la diferencia entre el consumo de energía entre 60 y 50 Hz es muy baja, del orden de centésimas; sin embargo, a 40 Hz se aprecia una considerable diferencia gráfica.

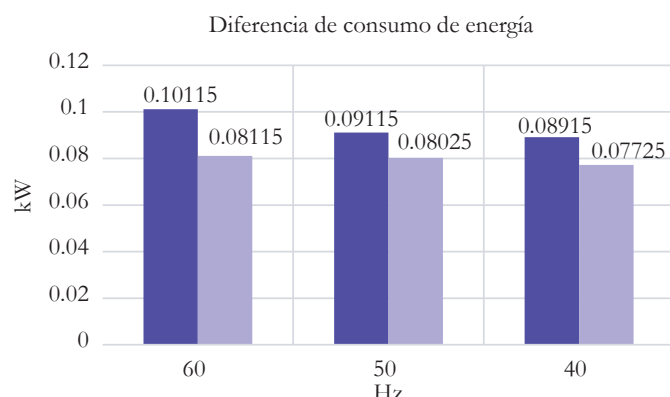
3.10. Análisis estadístico

En la Tabla 10 y en la Figura 35 se muestran los resultados comparativos para ambos métodos, es decir, tanto para el arranque estrella-triángulo como para el convertidor de frecuencia variable por una hora de trabajo a 40, 50 y 60 Hz. Así mismo, se observa que los valores de consumo de energía para el método del convertidor de frecuencia variable son menores que en el método de arranque estrella-triángulo. A una frecuencia de 60 Hz la diferencia es del 20%, a una frecuencia de 50 Hz la diferencia es del 12% y para una frecuencia de 40 Hz la diferencia es de 13% de ahorro de consumo de energía.

Tabla 10 Diferencia de consumo de energía entre arranque estrella-triángulo y convertidor de frecuencia variable

Frecuencia	Consumo de energía (kW)		Diferencia (%)
	Método estrella - triángulo	Convertidor de frecuencia variable	
60 Hz	0.10115	0.08115	20%
50 Hz	0.09115	0.08025	12%
40 Hz	0.08915	0.07725	13%

Figura 35 Diferencia de consumo de energía entre arranque estrella-triángulo y convertidor de frecuencia variable



Se realizó el análisis para la diferencia de consumo de energía para las diferentes frecuencias en ambos métodos. En la Tabla 10 se muestran las diferencias para una frecuencia de 60 Hz, también se aprecia que, por 8 horas de trabajo continuo, se llega a alcanzar una diferencia de hasta 30% de ahorro energético mediante el método de convertidor de frecuencia variable.

Tabla 11 Diferencia de consumo de energía para 60 Hz

Tiempo (horas)	Consumo de energía (kWh) a 60 Hz			
	Método estrella - triángulo	Convertidor de frecuencia variable	Diferencia (kW)	Diferencia (%)
1	0.101	0.081	0.02	20%
2	0.152	0.105	0.047	31%
3	0.182	0.127	0.055	30%
4	0.218	0.152	0.066	30%
5	0.262	0.182	0.08	31%
6	0.314	0.219	0.095	30%
7	0.377	0.263	0.114	30%
8	0.452	0.315	0.137	30%
Total	2.058	1.444	0.614	30%

Por otro lado, se realizó el mismo análisis, pero a una frecuencia de 50 Hz. Se aprecia que la reducción por concepto de consumo de energía durante 8 horas de trabajo continuo, es 23% menor cuando se utiliza el convertidor de frecuencia variable, lo que representa un total de 0.43 kW.

Tabla 12 *Diferencia de consumo de energía para 50 Hz*

Tiempo (horas)	Consumo de energía (kWh) a 50 Hz			
	Método estrella - triángulo	Convertidor de frecuencia variable	Diferencia (kW)	Diferencia (%)
1	0.091	0.08	0.011	12%
2	0.137	0.104	0.033	24%
3	0.164	0.125	0.039	24%
4	0.197	0.15	0.047	24%
5	0.236	0.18	0.056	24%
6	0.284	0.216	0.068	24%
7	0.34	0.26	0.08	24%
8	0.408	0.312	0.096	24%
Total	1.857	1.427	0.43	23%

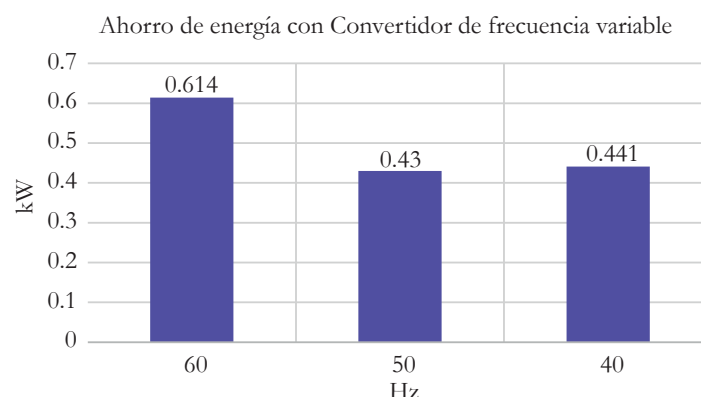
Así mismo, para una frecuencia de 40 Hz, la reducción de ahorro de energía, cuando se utiliza el convertidor de frecuencia variable, es del 24%, lo cual corresponde a 0.441 kW, como se muestra en la Tabla 13:

Tabla 13 *Diferencia de consumo de energía para 40 Hz*

Tiempo (horas)	Consumo de energía (kWh) a 40 Hz			
	Método estrella - triángulo	Convertidor de frecuencia variable	Diferencia (kW)	Diferencia (%)
1	0.089	0.077	0.012	13%
2	0.134	0.1	0.034	25%
3	0.16	0.121	0.039	24%
4	0.193	0.145	0.048	25%
5	0.231	0.174	0.057	25%
6	0.277	0.208	0.069	25%
7	0.333	0.25	0.083	25%
8	0.399	0.3	0.099	25%
Total	1.816	1.375	0.441	24%

En resumen, en la Figura 36 se muestra la reducción en el consumo de energía, cuando se utiliza el convertidor de frecuencia variable. A una frecuencia de 60 Hz se puede reducir hasta 0.614 kW.

Figura 36 Ahorro de energía con convertidor de frecuencia variable



En la Tabla 14 se muestra una proyección del ahorro de energía que tendría la universidad a diario, para un mes y para un año. La institución puede llegar a obtener un ahorro de S/. 1199.01 para una frecuencia de 60 Hz.

Tabla 14 Proyección de ahorro de energía

Frecuencia (Hz)	8 horas (kW/h)	Ahorro en S/. x día	1 mes (21 días) (kW/h)	Ahorro en S/. x mes	1 año (252 días) (kW/h)	Ahorro en S/. x año
60	0.61	4.758	12.81	99.98	153.72	1199.016
50	0.43	3.354	9.03	70.434	108.36	845.208
40	0.44	3.432	9.24	72.072	110.88	864.864

3.11. Análisis inferencial

Se aplicó la prueba de T de Students para dos muestras independientes, utilizando el software SPSS 26.

Hipótesis alterna (H1): Existe una diferencia significativa de ahorro en el consumo de energía eléctrica, para el funcionamiento del motor de inducción, utilizando el dispositivo de arranque convertidor de frecuencia variable frente al dispositivo de arranque estrella-triángulo en el laboratorio de la FIM UNCP.

Hipótesis nula (H0): No existe una diferencia significativa de ahorro en el consumo de energía eléctrica, para el funcionamiento del motor de inducción, utilizando el dispositivo de arranque convertidor de frecuencia variable frente al dispositivo de arranque estrella-triángulo en el laboratorio de la FIM UNCP.

Prueba de normalidad

Determinando $\alpha = 5\%$

Normalidad: Se utilizó la prueba de Shapiro Wilk, porque el tamaño de la muestra es menor a 30.

Criterio:

P-valor $\geq \alpha$ Aceptar H_0 = Los datos provienen de una distribución normal. P-valor $\leq \alpha$ Aceptar

H_1 = Los datos NO provienen de una distribución normal.

Tabla 15 Pruebas de normalidad

	Frecuencia	Kolmogorov-Smirnova			Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Con Energía	60 Hz Es	,130	8	,200*	,973	8	,922
	60 hz Va	,138	8	,200*	,960	8	,811

En la Tabla 15 se muestran los resultados de la prueba de normalidad, así mismo, se aprecia que los valores de la significancia (0.922 y 0.811) son mayores que $\alpha=0.05$. En consecuencia, la variable numérica tiene una distribución normal en los dos casos presentados en dicha tabla.

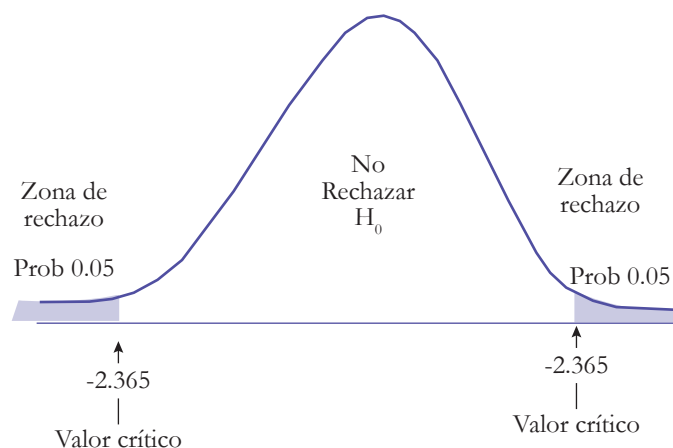
Prueba de igualdad de varianzas

Para la prueba de igualdad de varianzas se utilizó la prueba Levene, que permite establecer si las varianzas son iguales o no.

Tabla 16 Prueba de *t*-student

	Prueba de Levene de calidad de varianzas		Prueba t para la igualdad de medias						
			t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Diferencia de error estándar Inferior	95% de intervalo de confianza de la diferencia	
	F	Sig.						Superior	
Se asumen varianzas iguales	1.234	,285	1,514	14	,152	7,675,000	5,068,486	-31,95	185,45
No se asumen varianzas iguales			1,514	12,352	,155	7,675,000	5,068,486	-33,33	186,83

Figura 37 *Prueba de t-student*



Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna, es decir, sí existe una diferencia significativa de ahorro en el consumo de energía eléctrica, para el funcionamiento del motor de inducción, utilizando el dispositivo de arranque convertidor de frecuencia variable frente al dispositivo de arranque estrella- triángulo en el laboratorio de la FIM UNCP.

3.12. Discusión de resultados

Una vez culminados los apartados anteriores, en los cuales se especifican paso a paso los resultados, respecto a los objetivos específicos, se desprende, en relación con los parámetros de funcionamiento del motor, que la eficiencia es del 80%, la producción de energía es de 9.4208 kWh y que, para un período de 5 años a una razón de 8 horas por día, el total de producción de energía alcanza 11870.208 kWh.

Así mismo, el motor opera a un voltaje de 220/ 230 V, con una corriente de 6.9 A, 2 HP de potencia a 1.5 KW, mientras que su velocidad es de 1730 RPM a 60 Hz, y un factor de potencia de 0.9.

Con relación al consumo de energía y el método arranque estrella-triángulo durante 1 hora, para una frecuencia de 60 Hz se requieren 0.10115 kW, para 50 Hz se consumen 0.09115 kW, mientras que para una frecuencia de 40 Hz se requieren 0.08915 kW. Con este mismo método, pero bajo un período de operación de 8 horas de trabajo continuo, a 60 Hz el consumo de energía equivale a 2.058 kW, a 50 Hz son 1.857 Hz y a 40 Hz son 1.816 kW.

En relación con el consumo de energía, utilizando el convertidor de frecuencia variable durante 1 hora, para una frecuencia de 60 Hz se requieren 0.08115 kW, para 50 Hz se consumen 0.08025 kW, mientras que, para una frecuencia de 40 Hz, se requieren 0.07725 kW. Con este mismo método, pero bajo un período de operación de 8 horas de trabajo continuas, a 60 Hz el consumo de energía equivale a 1.444 kW, a 50 Hz son 1.427 Hz y a 40 Hz son 1.375 kW.

Comparando ambos métodos, durante un período de operación de 8 horas, a 60 Hz se obtiene un ahorro de consumo de energía del 30% con el convertidor de frecuencia variable, a 50 Hz obtiene un ahorro de consumo de energía del 23% y a 40 Hz el ahorro obtenido es de 24%. Este

ahorro de energía se traduce en un ahorro monetario para la FIM de la UNCP entre S/. 864.0 y S/. 1199.0 al año.

Por último, para el contraste de hipótesis se aplicó la prueba t-student, con los resultados, la cual pudo confirmar la aceptación de la hipótesis alterna de trabajo, es decir, sí existe una diferencia significativa de ahorro en el consumo de energía eléctrica, para el funcionamiento del motor de inducción, utilizando el dispositivo de arranque convertidor de frecuencia variable frente al dispositivo de arranque estrella-triángulo en el laboratorio de la FIM UNCP.

Resultados similares fueron obtenidos por Mallma (2019), quien estudió el funcionamiento del motor de inducción, considerando el nivel de tensión estándar adecuado. El autor logró determinar una diferencia de consumo de energía del 17.85%, utilizando un arranque a tensión reducida frente al método de arranque directo.

CONCLUSIONES

El control industrial representa un papel fundamental dentro de la automatización de procesos, los cuales tienen diversas demandas y requerimientos, entre ellos, el control de velocidad de rotación de los motores, para lo cual se disponen de diferentes métodos, por ejemplo, el uso de variadores de frecuencia de alimentación con el objetivo final de disminuir los costos altos de consumo de energía de las empresas.

En la presente investigación se tuvo como objetivo general optimizar el funcionamiento de un motor de inducción mediante un convertidor de frecuencia variable para un adecuado ahorro de energía eléctrica, en la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Nacional del Centro del Perú.

Los resultados obtenidos confirman que el uso del convertidor de frecuencia variable puede generar un ahorro de consumo energético de hasta el 30%, bajo una frecuencia de 60 Hz. Con ello se obtendría un ahorro económico anual en el orden de los S/1200.

Por lo tanto, con el método de aplicación del convertidor de frecuencia variable sí se puede optimizar el funcionamiento de un motor de inducción.

RECOMENDACIONES

En aras de optimizar el funcionamiento de los equipos, bajo un panorama actual de consecuencias del cambio climático, se hace necesario el planteamiento de medidas que puedan reducir el consumo de energía, el consumo de recursos, entre otros.

Además, se plantea, como principal recomendación de la presente investigación, que las instituciones de cualquier índole investiguen, diseñen e implementen programas de ahorro de energía, bajo diferentes métodos de operación, de manera que sean optimizados, sin afectar los objetivos organizacionales.

CAPÍTULO IV

IMPORTANCIA Y BENEFICIOS DEL AHORRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN MOTORES DE INDUCCIÓN

En la actualidad, se ha comprobado diversos beneficios que brinda el simple hecho de ahorrar energía eléctrica en motores de inducción. Se sabe que existe una disminución del impacto de la temperatura en la vida útil de un motor de esta clase. Y es que el motor de inducción es una máquina muy fuerte y de fácil construcción, su vida útil dependerá únicamente de cuánto dure la aislación de los bobinados.

Recordemos que los materiales aislantes pueden perjudicarse por diversos factores, como la humedad, los ambientes corrosivos, las vibraciones, etc., no obstante, su temperatura de trabajo es, en definitiva, el factor más importante, no porque se piense que el aumento considerable de la misma pueda ocasionar una reducción significativa de la vida útil de la máquina, o que debido a ella el aislante se queme o se destruya el bobinado de manera súbita; sino que suele suceder que el aislante se va resecaando de forma progresiva o conforme pase el tiempo de su función, pues llegará a un punto en que no soporte más la tensión aplicada y produzca un cortocircuito.

Sin embargo, es cierto que cuán más frío se encuentre el motor, más vida útil este tendrá, por ende, implicará mínimos problemas de operación del proceso, menores gastos de energía, mínimas probabilidades de que la máquina se estropee, independiente de cualquier falla que pueda haber, como resultado de la ineficiencia del procesador o fallos producidos por causas externas. Así mismo, la baja temperatura, o por debajo del nivel que pueda aguantar el aislante, evita también que haya intervenciones recurrentes de mantenimiento o demoras que afecten el engranaje de trabajo, o, lo que es peor aún, haya fallas más gravitantes, como la paralización total de la maquinaria, esto puede representar un serio problema de seguridad para los operadores y el personal en general, y, dicho sea de paso, generar gastos elevados.

El uso idóneo de un motor eléctrico supone un ahorro eficaz de energía, sobre todo en los complejos industriales o empresas con mayor demanda. Esto conlleva, además, la reducción de costos de operaciones y una notable mejora en la productividad. Ahora bien, si nos referimos a un motor de inducción en particular, este aportará velocidad y precisión adecuadas, lo cual se reflejará en el rendimiento del producto final.

La eficiencia energética debe ser el propósito de toda empresa o industria que desee instalar motores eléctricos, esto incluye el ahorro de costos operativos anuales, es decir, lo que compete a consumo de energía. Por lo que siempre se recomienda adquirir motores de inducción para instalaciones eléctricas nuevas, cuando el equipo sea adquirido en su totalidad, como compresores, acondicionadores de aire, bombas, etc.; en remodelaciones del proceso productivo o para el reemplazo de motores viejos, quemados o rebobinados.

Es importante saber que los motores de eficiencia normalizada conviene adquirirlos por varios factores, entre ellos porque son más rentables a largo plazo, pese a la inversión mayor que significa, en comparación con la compra de motores de eficiencia normal.

REFLEXIONES FINALES

Desde la Revolución Industrial hasta la actualidad, las máquinas eléctricas rotativas tienen una gran importancia en el desarrollo de la industria y son utilizadas en las diversas actividades de la vida diaria, tanto en empresas como en los hogares de los ciudadanos. Por ello, es menester que sean utilizadas de manera eficiente, asegurando que posean una potencia adecuada para realizar determinada labor o actividad, y que presenten la capacidad de control adecuado.

Para alcanzar un mejor manejo y aplicación de las máquinas eléctricas, es necesario que se conozca tanto su funcionamiento como las diferencias materiales y funcionales que poseen en sus diferentes tipos de máquinas eléctricas rotativas, puesto que, a partir de ello, es posible identificar la maquinaria que presenta mayores beneficios para cubrir las necesidades del usuario o el empresario.

En líneas generales, el funcionamiento y la composición de máquinas eléctricas rotativas se encuentran orientados al cumplimiento de la labor de conversión energética a partir del movimiento, conforme a las leyes de Faraday, Biot-Savart, Lenz, Ampere y Laplace. Este tipo de máquinas se encuentran constituidas por dos partes funcionales esenciales: el inductor y el inducido, estas se corresponden con las principales partes materiales: el estator y el rotor, según la función de transformación que cumpla la máquina, de modo que una máquina puede ser un motor cuando crea energía mecánica y un generador cuando crea energía eléctrica. Dichas máquinas poseen, además, otros elementos comunes, como el entrehierro, la chapa magnética o los escudos que se encargan de la actividad electromagnética que sucede dentro de la máquina.

Las máquinas eléctricas rotativas pueden clasificarse en función de generadores, motores y transformadores, y según su circuito en máquinas de corriente alterna (CA) y máquinas de corriente común (CC), y de acuerdo con su funcionamiento en síncronos, asíncronos, bobinados, de reluctancia o de excitación. A su vez, los motores pueden clasificarse, según su circuito en motores de CA y CC, o en torno a su dimensiones y cantidad de fases necesarias para el funcionamiento en motores trifásicos y motores monofásicos. El conocimiento sobre las diferencias entre estos distintos tipos y su funcionamiento permite que se identifiquen de manera más eficiente las ventajas y desventajas de cada modelo, según la función que se le quiera dar dentro de una máquina.

Dado que los motores son las máquinas que permiten realizar el trabajo, se le da una importancia particular a la investigación con respecto a sus efectos en el funcionamiento óptimo de las maquinarias dentro de las empresas. De entre todos los motores, el motor asíncrono o de inducción se presenta como uno de los más completos y útiles por su modelo tipo transformador, el cual se

adapta a diferentes necesidades.

El motor de inducción es como un motor de CA, que se caracteriza por funcionar a partir de una inducción de voltaje en el rotor y ejercer una función transformadora. Este tipo de motor funciona a partir de líneas de inducción y requiere que la velocidad de rotación no sea sincrónica para que haya FEM inducida; su potencia y eficiencia se encuentran relacionadas no solo con la velocidad y la frecuencia, sino con las pérdidas y la fricción; en consecuencia, para este tipo de motores de alto rendimiento es necesario que posean mecanismos de control que permitan solucionar de forma rápida las problemáticas que puedan presentarse.

El convertidor de frecuencia variable se presenta como una solución práctica, ante la necesidad de un mejor control sobre la variación de velocidad para reducir las pérdidas, mejorar la potencia, reducir la temperatura y la fricción, esto al convertir la velocidad y la frecuencia fijas en velocidad y frecuencia variables.

Los mencionados principios y conocimientos sobre los motores de inducción fueron aplicados en una investigación de caso, la cual demostró la manera en que el uso del convertidor de frecuencia variable optimizó el funcionamiento de la maquinaria en la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Nacional del Centro del Perú; para ello, se utilizó la observación y el registro de datos mediante reportes. Los resultados demostraron que, para optimizar el funcionamiento de los equipos, es necesario que se reduzca el consumo de energía y recursos, por lo que es necesario que se planteen programas que utilicen el convertidor de frecuencia variable para cumplir con este objetivo.

BIBLIOGRAFÍA

- BUN-CA. (2011). *Manual técnico: Motores eléctricos*. Programa de Eficiencia Energética en los Sectores Industrial y Comercial en América Central (PEER).
- Calcina, A. (2016). *Optimización del funcionamiento de un motor de inducción para el ahorro de energía eléctrica en el laboratorio UNCP* [Tesis de Maestría, Universidad Nacional del Centro del Perú]. <http://bdigital.unal.edu.co/10578/>
- Chapman, S. J. (2000). *Máquinas Eléctricas* (5ta ed.). Mc Graw-Hill Interamericana
- Corvalán, L. (2021). Factor de potencia y coseno de fi: las tres dimensiones de la corriente eficaz. *Rev. Ing. Eléctrica*, (), 2-6.
- Fraile Mora, J. (2003). *Máquinas Eléctricas* (5ta ed.). Mc Graw-Hill Interamericana
- Gómez Suárez, I. (2020). *Mantenimiento electromecánico de motores eléctricos*. Paraninfo.
- Hernández, R., Fernández, C., y Baptista, M. (2014). *Metodología de la investigación* (6ta. ed.). Editorial Mc Graw Hill.
- Hughes, A. (2006). *Electric Motors and Drives: Fundamentals, types and applications* (3ra ed.). Elsevier.
- KAI Grupo de Gestión Eficiente de Energía. (). Eficiencia Energética en Motores Eléctricos. Instituto colombiano para el desarrollo de la ciencia y la tecnología. “Francisco José de Caldas” [colciencias].
- Lozada, J. (2014). Investigación Aplicada. Definición, Propiedad Intelectual e Industria. *CienciAmérica: Revista de divulgación científica de la Universidad Tecnológica Indoamérica*, 3(1), 47-50. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6163749>
- Mallma, F. (2019). *Optimización del funcionamiento de motor de inducción en niveles de baja tensión estándares para el ahorro de energía eléctrica*. [Tesis de grado, la Universidad Continental]. Recuperado de: https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/6092/2/IV_FIN_109_TI_Mallma_Dolorier_2019.pdf

- Manzano, J. J. (2010). *Máquinas eléctricas*. Paraninfo.
- Martínez Betancourt, T. (2019). “Máquinas eléctricas rotativas” 243-281
- Renzetti, M. (2008). Notas sobre electricidad.
- Rodríguez Pozueta, M. (2017). *Arranque de motores asíncronos*. Universidad de Cantabria
- Serrano Iribarnegaray, L. y Martínez Román, J. A. (2017). *Máquinas Eléctricas*. Colección Académica. Editorial UPV.
- De la Torre, F. (2019). *ACCIONAMIENTOS ELECTROMECAÑICOS: Motor Asíncrono o de Inducción*. Universidad Nacional del Rosario. <http://hdl.handle.net/2133/16747>
- Quispe, E. y Mantilla, L. (2004). Motores eléctricos de alta eficiencia: características electromecánicas, ventajas y aplicabilidad. *Revista Energía y Computación*, 12(1), 1-10.
- Verdezoto, J. (2016). Estudio de las Leyes de Faraday, Lenz y Fleming. *Ingeniare Revista chilena de Ingeniería*,
- Verucchi, C., Ruschetti, C. R. y Kazlauskas, G. E. (2013). Ventajas económicas y energéticas en accionamientos con motores de alta eficiencia. *Ingeniería Eléctrica Editores S.R.L.*, 27(), 100-110.

