

Universidad Nacional de Ingeniería

Facultad de Ingeniería Mecánica

Laboratorio de Máquinas Eléctricas ML202B

Laboratorio 3:

**“Motor asíncrono trifásico
Rotor jaula de ardilla”**

Estudiante:

Josue Huaroto Villavicencio

20174070I

Docente:

Ing. Huamán Ladera Floren Acel

Fecha de presentación:

Miércoles 12 de agosto de 2020

P.A: 2020-1

LIMA - PERU



Índice

Índice de Figuras	II
Introducción	III
1. Objetivos	1
2. Precauciones	2
3. Fundamento teórico	3
3.1. Motores asíncronos trifásicos	3
3.1.1. Componentes principales	3
3.2. Rotor de Jaula de ardilla	3
3.3. Par inducido en un motor de inducción	4
3.4. Funcionamiento	4
3.4.1. El campo rotatorio	5
3.5. Características de arranque	7
3.6. Tipos de rotores	8
3.6.1. Rotor de jaula de ardilla simple	8
3.6.2. Rotor de jaula de ardilla doble	8
3.6.3. Rotor con ranura profunda	8
3.6.4. Rotor de anillos rozantes	8
3.7. Aplicaciones comunes	8
4. Equipos y máquinas eléctricas a utilizar	9
5. Ensayos normalizados	12
5.1. Conexión del motor asíncrono trifásico - jaula de ardilla normalizado (IEC 34-8) . . .	12
5.2. Medición de la resistencia del estator normalizado IEEE 112/1978	12
5.3. Medición de la resistencia de aislamiento normalizado IEEE 112/1978	12
5.3.1. Circuito equivalente en un motor asíncrono	13
5.4. Prueba en vacío IEEE 112/1978	14
5.5. Prueba de rotor bloqueado IEEE 112/1978	14
5.6. Prueba con carga IEEE 112/1978	15
5.7. Ensayo de temperatura IEEE 112/1978	15
5.8. Compensación reactiva IEC 831 y VDE 560	15
6. Aplicaciones industriales	16
7. Cuestionario	17
8. Recomendaciones	20
9. Conclusiones	20
Anexos	21
Bibliografía	30

Índice de figuras

1.	Estator elemental con sus terminales A, B y C	5
2.	Valores instantáneos de las corrientes y posición de flujo	6
3.	Patrón de flujo	7
4.	Autotransformador variable	9
5.	Motor jaula de ardilla trifásico	9
6.	Banco activo de pruebas	10
7.	Diagrama de circuito (conexión delta)	12
8.	Esquema de montaje (conexión delta)	13
9.	Circuito equivalente en un motor asíncrono	13
10.	Conexiones realizadas	18
11.	Ensayo de vacío - P vs I	22
12.	Ensayo de vacío - f_{dp} vs P	23
13.	Ensayo de vacío	23
14.	Ensayo de cortocircuito - P vs I	24
15.	Ensayo de cortocircuito - f_{dp} vs P	24
16.	Ensayo de cortocircuito	25
17.	Ensayo de carga - P vs I	25
18.	Ensayo de carga - T vs P	26
19.	Ensayo de carga - f_{dp} vs RPM	26
20.	Ensayo de cortocircuito	27

Introducción

Las máquinas asíncronas se utilizan en aplicaciones de hasta el rango de los MW. Su construcción sencilla con rotor tipo jaula de ardillas las convierte en motores de uso más frecuente. Estos motores asíncronos trifásicos industriales pueden ser:

- Motores trifásicos con rotor jaula de ardilla (una jaula, doble jaula, jaula tratada y ranura profunda).
- Motores trifásicos con polos conmutables con bobinado Dahlander.
- Motores trifásicos con polos conmutables con dos bobinados separados.

Los motores se utilizan en los sectores industriales más variados, como por ejemplo las industrias alimentaria, química, metalúrgica, papelera, minera o las instalaciones de tratamiento de aguas. Las aplicaciones incluyen máquinas con piezas móviles a velocidad fija o variable, como por ejemplo los sistemas de elevación, como ascensores o montacargas; de transporte, como las cintas transportadoras; los sistemas de ventilación y climatización, como las unidades de tratamiento de aire; y su uso más común: las bombas y compresores.

Estos hechos evidencian por qué el motor asíncrono trifásico puede considerarse como la máquina eléctrica más ampliamente utilizada en el entorno industrial.

1. Objetivos

Los objetivos del presente laboratorio son:

1. Hacer conocer la constitución electromecánica de los motores asíncronos.
2. Familiarizarse con la simbología y conexionado de las máquinas eléctricas de nuestro laboratorio en los ensayos según las normas IEC y NEMA.
3. Conexión y puesta en servicio del motor.
4. Inversión del sentido de giro (utilizando un conmutador manual).
5. A partir de los ensayos realizados obtener el circuito monofásico equivalente.
6. Registro de los valores característicos y curvas características (FP, EF, Torque) de funcionamiento específicas de las máquinas asíncronas.
7. Evaluación de las mediciones realizadas y registradas.
8. Presentación del protocolo de pruebas según normas establecidas.

2. Precauciones

Dados las circunstancias del laboratorio y teniendo en cuenta que los equipos son muy valiosos es que se debe tener muy en cuenta lo siguiente:

1. Verificar el dimensionamiento de la instrumentación a utilizarse, así mismo constatar que los esquemas estén bien planteados.
2. Para evitar el deterioro y/o avería de los instrumentos y equipos, **no debe accionarse los equipos bajo ningún motivo, sin la aprobación del profesor.**
3. Para evitar el deterioro de los amperímetros, en el momento del arranque se debe poner el amperímetro de línea en corto circuito (utilizando un puente) y siempre el arranque debe hacerse en estrella-triángulo a plena tensión.
4. Luego de unos 5 segundos hacer el cambio a triángulo y seguidamente retirar el puente del amperímetro. Si es posible hacer el arranque a tensión reducida estando el motor en la posición triángulo.
5. La escala de todos los instrumentos debe ser la máxima.
6. Al operar el freno, comenzar con una carga mínima y aumentarlo en forma gradual hasta llegar al máximo permisible.

3. Fundamento teórico

3.1. Motores asíncronos trifásicos

Este motor se creó debido a la demanda de un motor síncrono polifásico con arranque propio en tamaños menores, de menos de 50 HP. Que no necesitarán excitación del campo con CD y que poseen las características de velocidad constante del motor. El rotor consiste de un devanado de jaula de ardilla embobinado o vaciado, distribuido uniformemente en las ranuras.

Cuando una corriente alterna polifásica se aplica a la armadura normal de un estator polifásico, el motor arranca como motor de inducción. Debido al rotor de polo saliente, el motor llega muy fácil a su sincronía y desarrolla con rapidez el par máximo del motor síncrono de la máquina de polos salientes.

Así el motor síncrono de inducción desarrolla el par de reluctancia, proporcional a $\sin(2\alpha)$ y al cuál se le llama a veces motor polifásico de reluctancia. Pero este es un nombre equivocado porque el motor síncrono de inducción trabaja con las características combinadas del par del motor síncrono y de inducción. Cuando está diseñado con devanados de rotor de alta resistencia, se pueden desarrollar pares de arranque bastante altos, hasta del 400 % del par a plena carga. Por otro lado, el empleo de devanados del rotor con alta resistencia ocasiona desplazamiento mayor, menor eficiencia y menor posibilidades de entrada en sincronismo con carga mediante el par de reluctancia.

Las máquinas de inducción trifásicas comprenden tanto motores como generadores. Los motores de inducción (o motores asíncronos) trifásicos son los motores más utilizados en la industria. Son simples, resistentes, baratos y fáciles de mantener. Funcionan a velocidad esencialmente constante desde cero hasta plena carga. La velocidad depende de la frecuencia, por lo que estos motores no se adaptan con facilidad al control de velocidad. Sin embargo, cada vez se utilizan más los controladores electrónicos de frecuencia variable para controlar la velocidad de motores de inducción comerciales.

3.1.1. Componentes principales

Un motor de inducción trifásico consta de dos partes principales: un estator estacionario y un rotor giratorio. El rotor está separado del estator por un pequeño entrehierro que va de 0.4 mm a 4mm, según la potencia del motor.

El **estator** consta de un armazón de acero que soporta un núcleo cilíndrico hueco compuesto de laminaciones apiladas. Varias ranuras equidistantes entre sí, hechas en la circunferencia interna de las laminaciones, proporcionan el espacio para el devanado del estator.

El **rotor** también se compone de laminaciones ranuradas. Éstas están apiladas cuidadosamente para crear una serie de ranuras para el devanado del rotor. Se utilizan dos tipos de devanados de rotor:

- Devanados trifásicos convencionales hechos de alambres aislado.
- Devanados de jaula de ardilla.

El tipo de devanado da lugar a dos clases principales de motores: **motores de inducción de jaula de ardilla** y **motores de inducción de rotor devanado**.

3.2. Rotor de Jaula de ardilla

Se compone de barras de cobre, un poco más largas que el rotor, las cuales están insertadas en las ranuras por uno de sus extremos. Los extremos opuestos se sueldan a dos anillos de cobre para que todas las barras estén en cortocircuito entre sí. Toda la construcción (barras y anillos extremos) se asemeja a una jaula de ardilla, de donde se deriva el nombre. En motores pequeños y medianos, las barras y los anillos extremos son de aluminio moldeado a presión y forman un bloque integral.

En su forma instalada, es un cilindro montado en un eje. Internamente contiene barras conductoras longitudinales de aluminio o de cobre con surcos y conectados juntos en ambos extremos poniendo en cortocircuito los anillos que forman la jaula.

El nombre se deriva de la semejanza entre esta jaula de anillos y barras y la rueda de un hámster (ruedas probablemente similares existen para las ardillas domésticas). La base del rotor se construye de un apilado de hierro de laminación.

3.3. Par inducido en un motor de inducción

Al aplicar al estator un conjunto trifásico de voltajes, un conjunto trifásico de corrientes estatóricas que producen un campo magnético \mathbf{B} , que rota en dirección contraria a las manecillas del reloj. La velocidad de rotación del campo magnético está dada por:

$$n_{\text{sinc}} = \frac{120f_e}{P} \quad (1)$$

Donde f_e es la frecuencia del sistema, en hertz, y P es el número de polos de la máquina. Este campo magnético rotacional B pasa sobre las barras del rotor e induce voltaje en ellas.

El voltaje inducido en una barra determinada del rotor está dado por la ecuación:

$$e_{\text{ind}} = (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{l} \quad (2)$$

donde

- \mathbf{v} : velocidad de la barra
- \mathbf{B} : vector de densidad de flujo magnético
- \mathbf{l} : longitud del conductor en el campo magnético

El movimiento relativo del rotor con respecto al campo magnético del estator produce voltaje inducido en una barra del rotor. La velocidad de las barras de la parte superior del rotor, con relación al campo magnético, tiende hacia la derecha de modo que el voltaje inducido en las barras superiores tiende hacia fuera de la página. Esto origina un flujo de corriente hacia fuera en las barras superiores, y hacia dentro en las inferiores. Finalmente, puesto que el par inducido está dado por

$$\tau_{\text{ind}} = k\mathbf{B}_R \times \mathbf{B}_S \quad (3)$$

la dirección del par resultante va en sentido contrario a las manecillas del reloj. Puesto que la dirección del par inducido en el rotor va en sentido contrario a las manecillas del reloj, el rotor se acelera en esa dirección.

3.4. Funcionamiento

La operación de un motor de inducción trifásico está basada en la aplicación de la ley de Faraday y la fuerza de Lorentz en un conductor.

1. Se induce un voltaje $E = Blv$ en cada uno de los conductores mientras el flujo pasa por ellos (ley de Faraday).
2. El voltaje inducido produce de inmediato una corriente I , la cual fluye por el conductor debajo de la cara del polo, a través de las barras extremas y regresa a través de los demás conductores.
3. Como el conductor que transporta corriente queda en el campo magnético del imán permanente, experimenta una fuerza mecánica (fuerza de Lorentz).
4. La fuerza siempre actúa en una dirección para arrastrar el conductor junto con el campo magnético.

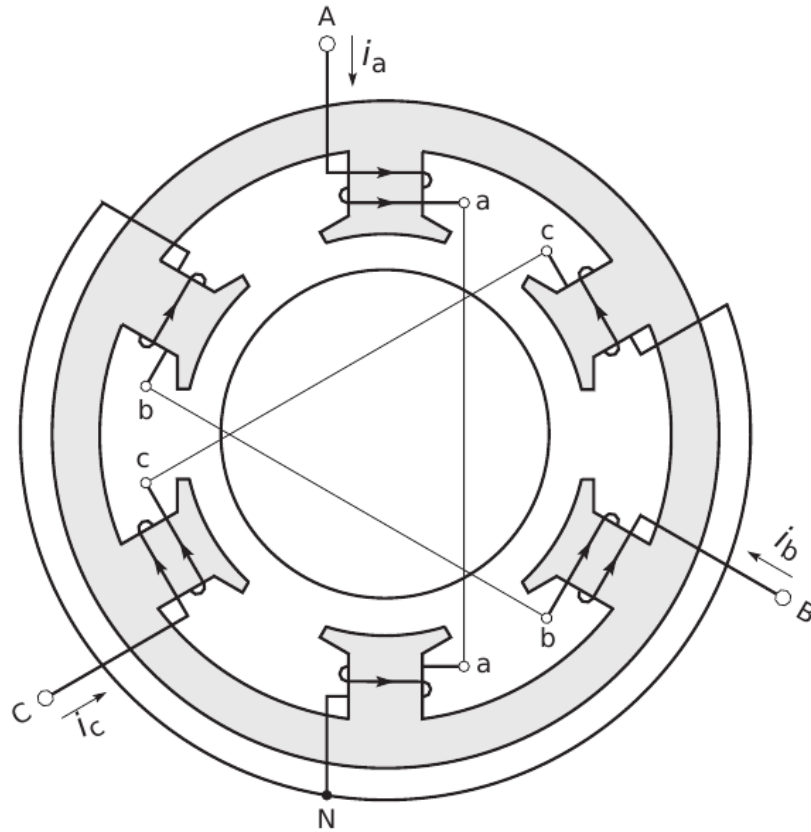


Figura 1: Estator elemental con sus terminales A, B y C

Los devanados en el estator de un motor de inducción instan al campo magnético a rotar alrededor del rotor. El movimiento relativo entre este campo y la rotación del rotor induce corriente eléctrica, un flujo en las barras conductoras.

Alternamente estas corrientes que fluyen longitudinalmente en los conductores reaccionan con el campo magnético del motor produciendo una fuerza que actúa tangente al rotor, dando por resultado un esfuerzo de torsión para dar vuelta al eje. En efecto, el rotor se lleva alrededor el campo magnético, pero en un índice levemente más de la rotación. La diferencia en velocidad se llama deslizamiento y aumenta con la carga.

A menudo, los conductores se inclinan levemente a lo largo de la longitud del rotor para reducir ruido y para reducir las fluctuaciones del esfuerzo de torsión que pudieron resultar, a algunas velocidades, y debido a las interacciones con las barras del estator. El número de barras en la jaula de la ardilla se determina según las corrientes inducidas en las bobinas del estator y por lo tanto según la corriente a través de ellas. Las construcciones que ofrecen menos problemas de regeneración emplean números primos de barras.

El núcleo de hierro sirve para llevar el campo magnético a través del motor. En estructura y material se diseña para reducir al mínimo las pérdidas. Las láminas finas, separadas por el aislamiento de barniz, reducen las corrientes parásitas que circulan resultantes de las corrientes de Foucault. El material, un acero bajo en carbono pero alto en silicio, con varias veces la resistencia del hierro puro, en la reductora adicional. El contenido bajo de carbono le hace un material magnético suave con pérdidas bajas por histéresis.

El mismo diseño básico se utiliza para los motores monofásicos y trifásicos sobre una amplia gama de tamaños. Los rotores para trifásica tienen variaciones en la profundidad y la forma de barras para satisfacer los requerimientos del diseño. Este motor es de gran utilidad en variadores de velocidad.

3.4.1. El campo rotatorio

Considere un estator simple que tiene 6 polos salientes, cada uno de los cuales porta una bobina de 5 vueltas (Figura 1). Las bobinas que se encuentran diametralmente opuestas están conectadas

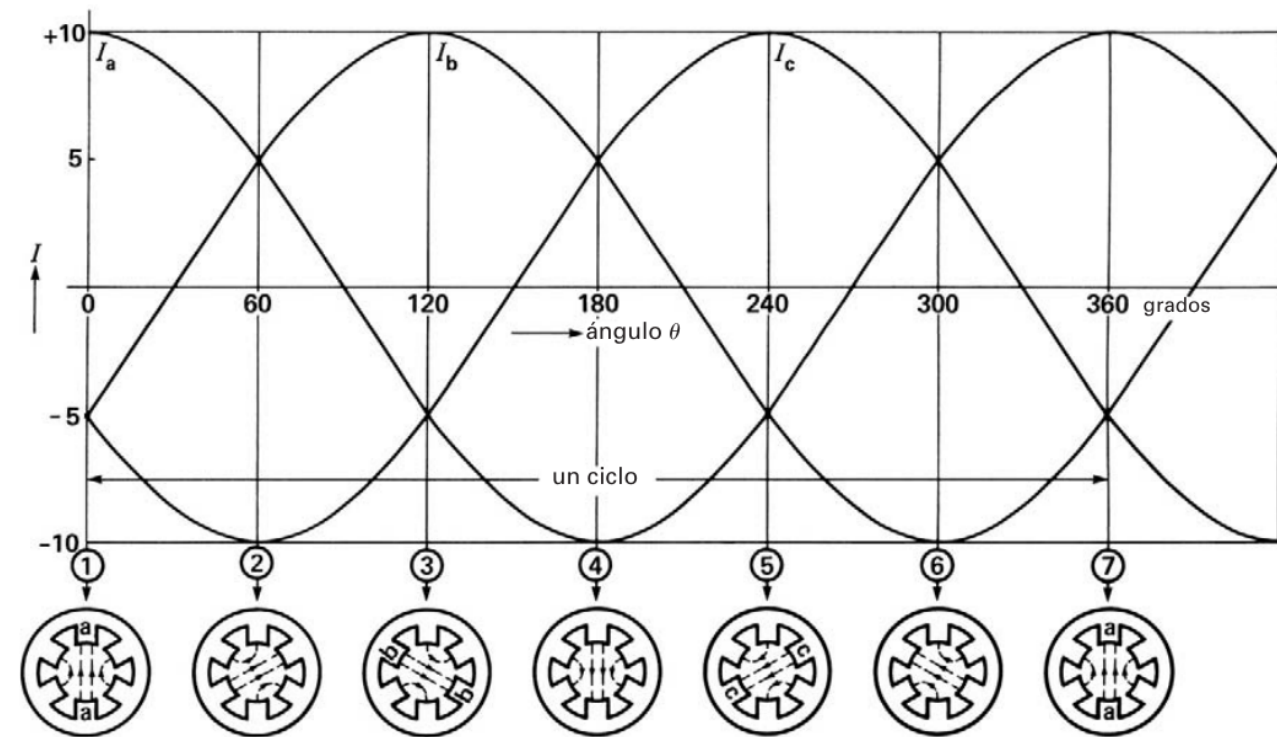


Figura 2: Valores instantáneos de las corrientes y posición de flujo

en serie por medio de tres puentes o alambres de cierre que conectan respectivamente las terminales a-a, b-b y c-c. Esto crea tres juegos idénticos de devanados AN, BD, CN que están separados mecánicamente 120° entre sí.

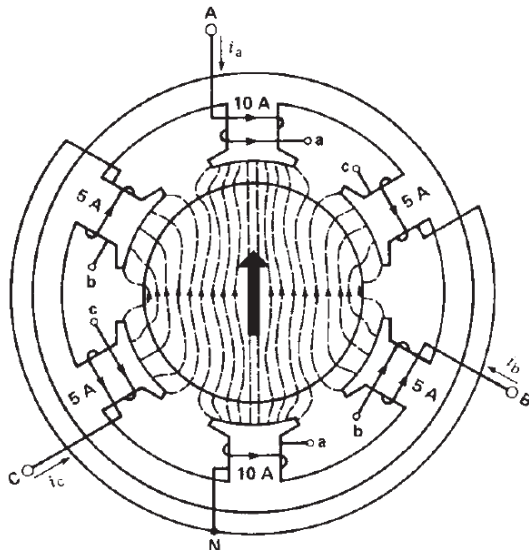
Las dos bobinas de cada devanado producen fuerzas magnetomotrices que actúan en la misma dirección.

Los tres juegos de devanados están conectados en Y, por lo que forman un neutro común N, A causa de la disposición perfectamente simétrica, las impedancias de línea a neutro son idénticas. En otras palabras, en lo referente a las terminales A, B, C, los devanados constituyen un sistema trifásico balanceado.

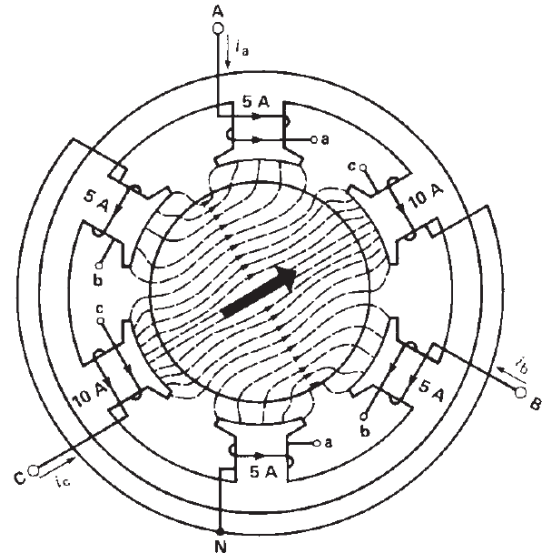
Si conectamos una fuente trifásica a las terminales A, B, C, las corrientes alternas I_a, I_b, I_c fluirán en los devanados. Las corrientes tendrán el mismo valor pero con el tiempo estarán desplazadas en un ángulo de 120° . Estas corrientes producen fuerzas magnetomotrices que, a su vez, crean un flujo magnético. Este flujo es el que nos interesa.

Para seguir la secuencia de eventos, suponemos que las corrientes positivas siempre fluyen en los devanados de la línea al neutro. A la inversa, las corrientes negativas fluyen del neutro a la línea. Además, para poder trabajar con números, supongamos que la corriente pico por fase es de 10 A. Por lo tanto, cuando $I_a = +7A$, las dos bobinas de la fase A juntas producirán una fmm de $7 A \times 10 \text{ vueltas} = 70 \text{ ampere-vueltas}$ y un valor de flujo correspondiente. Como la corriente es positiva, el flujo es dirigido verticalmente hacia arriba, de acuerdo con la regla de la mano derecha.

Conforme pasa el tiempo, podemos determinar el valor instantáneo y la dirección de la corriente en cada devanado y establecer de esa manera los patrones de flujo sucesivos. Por lo tanto, de acuerdo con la Figura 2, en el instante 1 la corriente I_a tiene un valor de $+10A$, mientras que I_b e I_c tienen un valor de $-5A$. La fmm de la fase A es $10 A \times 10 \text{ vueltas} = 100 \text{ ampere-vueltas}$, mientras que las fmm de las fases B y C son de $50 \text{ ampere-vueltas}$. La dirección de las fmm depende de los flujos de corriente instantáneos y, utilizando la regla de la mano derecha, encontramos que la dirección del campo magnético resultante es la que se indica en la Figura 3.



Patrón de flujo en instante 1



Patrón de flujo en instante 2

Figura 3: Patrón de flujo

Los seis polos salientes juntos producen un campo magnético que tiene básicamente un amplio polo norte y un amplio polo sur. Esto significa que al estator de 6 polos produce en realidad un campo de 2 polos. El campo magnético combinado apunta hacia arriba.

En el instante 2, un sexto de ciclo más tarde, la corriente I_c , alcanza un pico de -10 A, en tanto que I_a e I_b tienen un valor de +5 A. Entonces el nuevo campo tiene la misma forma que antes, excepto que se ha movido un ángulo de 60° en el sentido horario. En otras palabras, el flujo realiza $1/6$ de vuelta entre los instantes 1 y 2.

3.5. Características de arranque

Cuando se conecta un estator de un motor de inducción a una fuente trifásica, con el rotor bloqueado. El flujo rotatorio creado por el estator atraviesa las barras del rotor e induce un voltaje en ellas.

Éste es un voltaje de ca porque cada conductor es atravesado, en rápida sucesión, por un polo N seguido por un polo S. La frecuencia del voltaje depende del número de polos N y S que pasan por un conductor por segundo; cuando el rotor está en reposo, siempre es igual a la frecuencia de la fuente.

Como los anillos extremos ponen en cortocircuito las barras del rotor, el voltaje inducido hace que fluya una gran corriente (por lo general de varios cientos de amperes por barra en máquinas de mediana potencia). Los conductores que transportan corriente se encuentran en la trayectoria del flujo creado por el estator, así que todos experimentan una fuerte fuerza mecánica. Estas fuerzas tienen a arrastrar el rotor junto con el campo rotatorio.

1. Se establece un campo magnético rotatorio cuando se aplica un voltaje trifásico al estator de un motor de inducción.
2. El campo rotatorio induce un voltaje en las barras del rotor.
3. El voltaje inducido crea grandes corrientes que fluyen en las barras del rotor y en los anillos extremos.
4. Las barras del rotor que transportan corriente están dentro del campo magnético creado por el estator; por lo tanto, se ven sometidas a una gran fuerza mecánica.
5. La suma de las fuerzas mecánicas en todas las barras del rotor produce un par o momento de torsión que tiende a arrastrar el rotor en la misma dirección del campo rotatorio.

3.6. Tipos de rotores

Existen varios tipos de estos elementos, pero los que son más usados en la industria; es decir, los rotores para motores asíncronos de corriente alterna son 4.

3.6.1. Rotor de jaula de ardilla simple

Los círculos negros que se muestran en la figura representan las ranuras del rotor donde va introducido el bobinado. Existen varios tipos de ranuras, de ahí que existan varios tipos de rotores.

Este tipo de rotor es el usado para motores pequeños, en cuyo arranque la intensidad nominal supera 6 o 8 veces a la intensidad nominal del motor. Soporta mal los picos de cargas. Está siendo sustituido por los rotores de jaula de ardilla doble en motores de potencia media. Su par de arranque no supera el 140 % del nominal.

3.6.2. Rotor de jaula de ardilla doble

La ranuras es doble, por este motivo tiene el nombre de ardilla doble. Las dos ranuras están separadas físicamente, aunque en el dibujo no se observe.

Este tipo de rotor tiene una intensidad de arranque de 3 o 5 veces la intensidad nominal, y su par de arranque puede ser de 230 % la nominal. Estas características hacen que este tipo de rotor sea muy interesante frente al rotor de jaula de ardilla simple. Es el más empleado en la actualidad, soporta bien las sobrecargas sin necesidad de disminuir la velocidad, lo cual le otorga mayor estabilidad.

3.6.3. Rotor con ranura profunda

Es una variante del rotor de jaula de ardilla simple, pero se le denomina rotor de ranura profunda. Sus características vienen a ser iguales a la del rotor de jaula simple. Es usado para motores de baja potencia que necesitan realizar continuos arranques y paradas.

3.6.4. Rotor de anillos rozantes

Se denominan rotores de anillo rozantes porque cada extremos del bobinado está conectado con un anillo situado en el eje del rotor. Las fases del bobinado salen al exterior por medio de unas escobillas que rozan en los anillos.

Conectando unas resistencias externas a las escobillas se consigue aumentar la resistencia rotórica, de esta forma, se logra variar el par de arranque, que puede ser, dependiendo de dichas resistencias externas, del 150 % y el 250 % del par normal. La intensidad nominal no supera las 2 veces la intensidad nominal del motor.

3.7. Aplicaciones comunes

Los motores de la línea monofásica pueden ser clasificados como “Motores de Uso general”; sin embargo, pueden ser empleados, sin ningún problema, en aplicaciones específicas como:

- Aplicaciones en ambientes polvosos.
- Bombas centrífugas.
- Compresores.
- Ventiladores.
- Bombas de combustible.
- A prueba de explosión.
- Lavadoras y electrodomésticos en general.

4. Equipos y máquinas eléctricas a utilizar

1. Autotransformador variable.



Figura 4: Autotransformador variable

2. Motor jaula de ardilla trifásico.

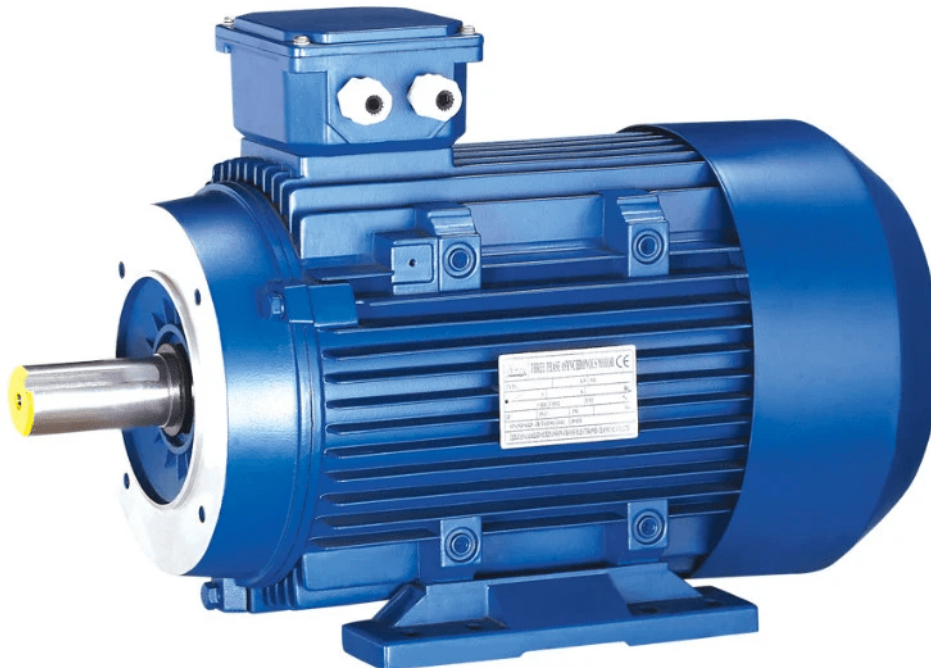


Figura 5: Motor jaula de ardilla trifásico

3. Banco activo de pruebas.



Figura 6: Banco activo de pruebas

Banco activo de pruebas	
N° de pedido	SO3636-6U
Tensión Nominal	230 Voltios
Corriente Nominal	3 Amperios
Corriente Arranque	9 Amperios
Torque Máximo	10 N-m
Potencia Aparente	800 VA
Régimen de servicio	S ₁
RPM máx	4000
Grado de protección	IP ₂₀
Amplificador Integrado	
Tensión de pico	600 Voltios
Tensión RMS	400 Voltios
Corriente pico	10 Amperios
Corriente RMS	7 Amperios

Motor asíncrono trifásico	
N°	
Tensión	400/690 Voltios
Corriente	1.73/0.81 Amperios
Conexión	D/Y
Frecuencia	60 Hz.
Potencia	0.37 kW
Régimen de servicio	S ₁
RPM máx	2800
Grado de protección	IP ₅₄
IKL	B
Norma	VDE 0530
Termostato	120° C
Factor de potencia	0.84
Motor tipo jaula de ardilla	

Descripción de máquinas y equipos		
Item	Descripción general de las máquinas y equipos	Cantidad
1	Manguito de acoplamiento	01
2	Cubierta de acoplamiento	01
3	Interruptor de 04 polos	01
4	Conmutador D-Y	01
5	Fuente de corriente alterna regulable adecuada	01
6	Multímetro analógico/digital, FP, KW, KVARs	02
7	Multímetro digital FLUKE	01
8	Unidad condensadora	01
9	Conectores de seguridad	04
10	Juego de cables de 4 mm ²	25

5. Ensayos normalizados

- 5.1. Conexión del motor asíncrono trifásico - jaula de ardilla normalizado (IEC 34-8)
- 5.2. Medición de la resistencia del estator normalizado (IEEE 112/1978 ítem 4.1)
- 5.3. Medición de la resistencia de aislamiento normalizado (IEEE 112/1978 ítem 4.1)

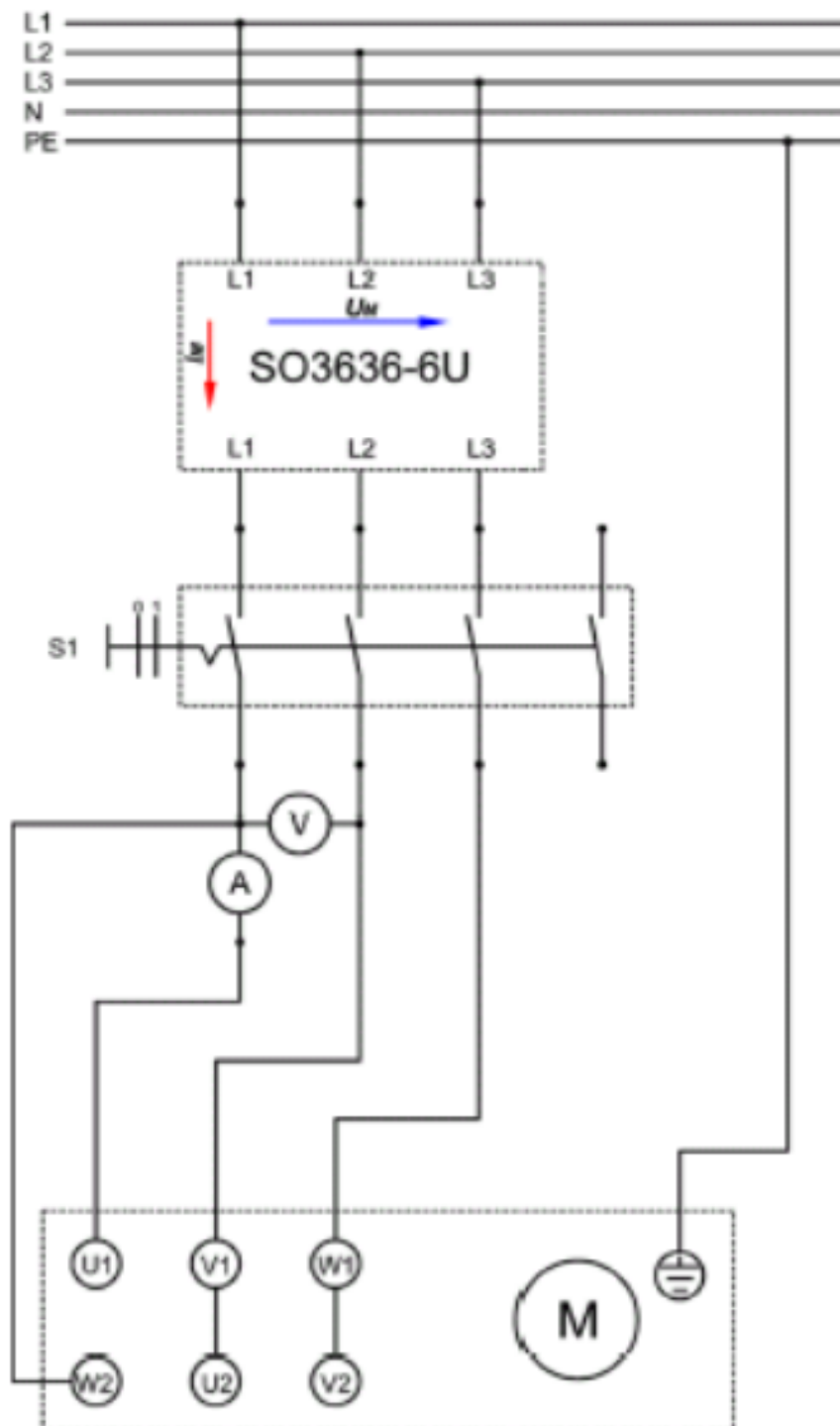


Figura 7: Diagrama de circuito (conexión delta)

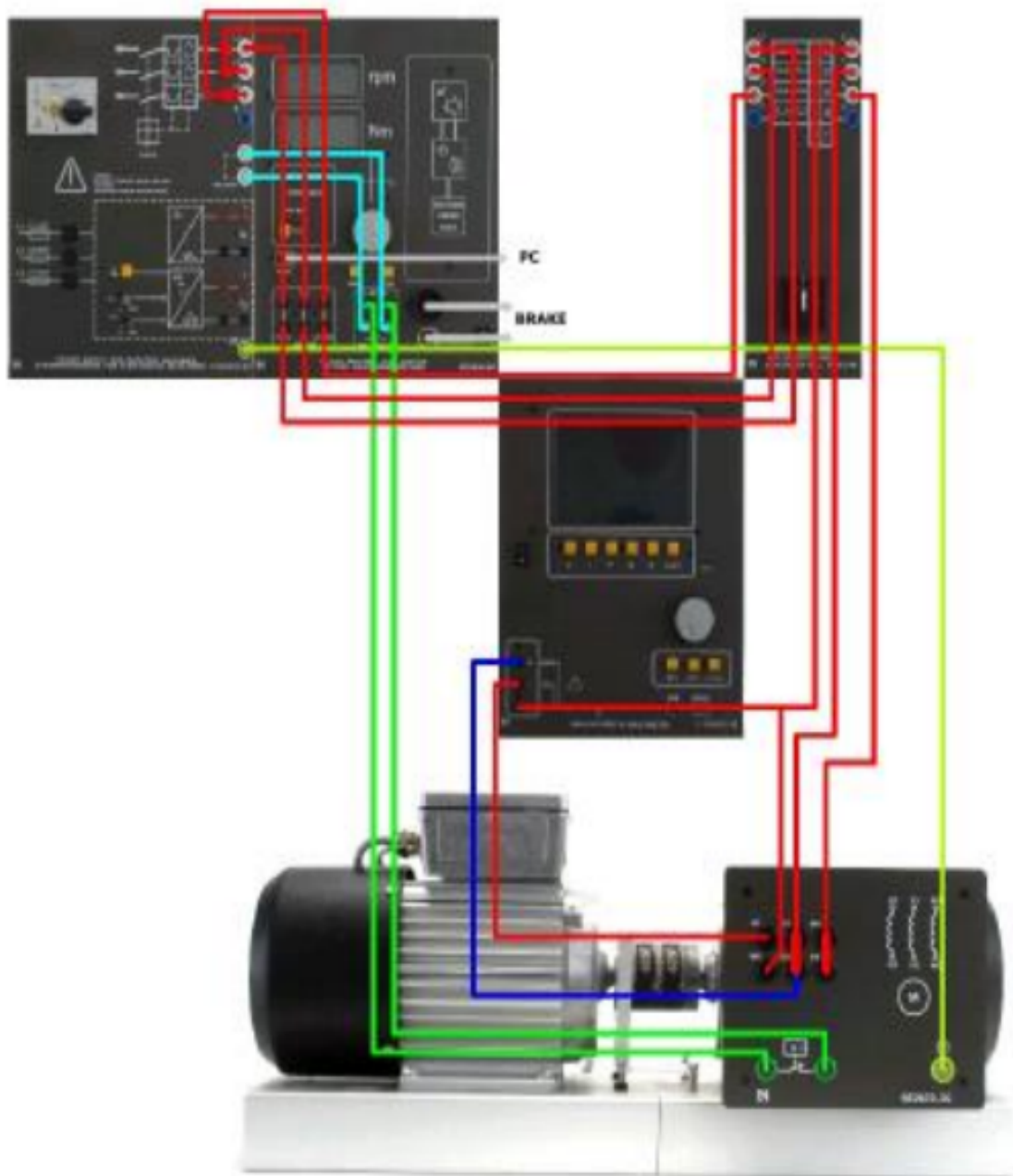


Figura 8: Esquema de montaje (conexión delta)

5.3.1. Circuito equivalente en un motor asíncrono

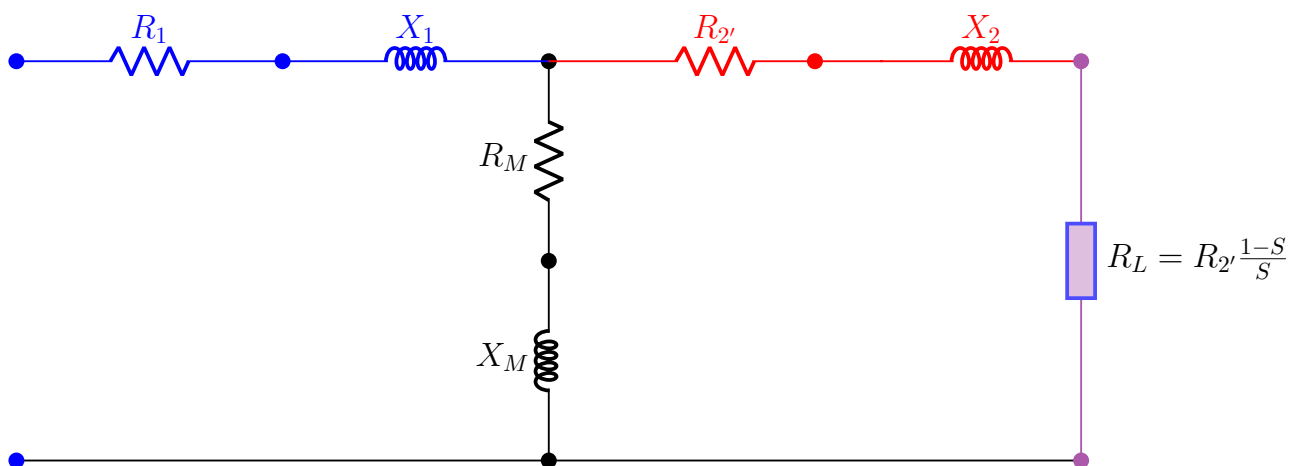


Figura 9: Circuito equivalente en un motor asíncrono

5.4. Prueba en vacío (IEEE 112/1978 ítem 4.6)

El montaje del motor se realiza conforme a la siguiente figura. Con el motor trifásico en vacío la tensión de alimentación se regula hasta que el voltímetro indique la tensión nominal del motor ha ser probado (ver placa). Los instrumentos de medida que se utilicen durante la práctica, ya están incluidos dentro del pupitre de prácticas.

Las condiciones son las siguientes:

- La velocidad debe ser constante
- El eje del motor debe estar completamente libre.
- La frecuencia debe ser la nominal del motor.

Con la finalidad de verificar las curvas de vacío sobreponerlos con las B vs H.

$$B_{\text{máx}} = \frac{V_{LL} \times 10^{-8}}{4,44 \times f A N} \quad (4)$$

$$H = \frac{N \times \sqrt{3} I f}{L_m} \quad (5)$$

Donde:

- L_m : Longitud media al paquete magnético (m).
- N : Número de vueltas del bobinado estatórico por fase.
- A : Área transversal del paquete magnético estatórico = $L \times C$
- L : Longitud del paquete magnético (m).
- C : Altura de la corona (m).
- f : Frecuencia del sistema (Hz).
- V_{LL} : Tensión de línea en Voltios.

$$Z_0 = \frac{V_0}{I_0} \quad (6)$$

$$R_0 = \frac{P_0}{I_0^2} = R_1 + R_M \quad (7)$$

$$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2} = X_1 + X_M \quad (8)$$

5.5. Prueba de rotor bloqueado (IEEE 112/1978 ítem 4.8)

Las condiciones son las siguientes:

- La corriente de línea debe ser la nominal del motor.
- El eje del motor debe estar trabado.
- La frecuencia debe ser la nominal del motor.

Para el ensayo de rotor bloqueado se utilizará exactamente el mismo esquema de conexiones que para el caso del ensayo de vacío. La única diferencia estribará en que en este caso se alimentará el motor con una tensión mucho más reducida que la nominal. A partir de 0 voltios se irá aumentando la tensión hasta que el motor alcance la corriente nominal, todo ellos manteniendo el rotor bloqueado. **Se deberá poner especial atención en no superar la corriente nominal del motor para evitar que los devanados sufran daños.** Como resultado del ensayo se registrarán la tensión, la corriente y la potencia en este ensayo.

$$Z_{cc} = \frac{V_{cc}}{I_{cc}} \quad (9)$$

$$R_{cc} = \frac{P_{cc}}{I_{cc}^2} = R_1 + R_2' \quad (10)$$

$$X_{cc} = \sqrt{Z_{cc}^2 - R_{cc}^2} = X_1 + X_2' \quad (11)$$

Reactancias estatóricas y retóricas - IEEE 112 1978 ITEM 4.8					
Tipo de motor	NEMA A	NEMA B	NEMA C	NEMA D	Rotor bobinado
X_1	$0.5 X_{cc}$	$0.4 X_{cc}$	$0.3 X_{cc}$	$0.5 X_{cc}$	$0.5 X_{cc}$
X_2'	$0.5 X_{cc}$	$0.6 X_{cc}$	$0.7 X_{cc}$	$0.5 X_{cc}$	$0.5 X_{cc}$

5.6. Prueba con carga (IEEE 112/1978 item 4.2)

1. Para la prueba con carga se tendrá que conectar el freno LN.
2. Seguir las indicaciones del profesor.
3. En forma muy atenta y delicada manipular el regulador de velocidad del freno dinámico hasta que la corriente circulante consumida por el motor es la corriente nominal.
4. Después del registro de las cargas aplicadas en el motor tomar el registro de la velocidad y el torque. Aplicando la siguiente expresión se logrará calcular la potencia útil:

$$P_{\text{util}} = T \text{ (N-m)} \times \text{RPM} (\pi/30) \quad (12)$$

$$\text{EF} = \frac{P_{\text{util}}}{P_{\text{ingreso}}} \quad (13)$$

Prueba con carga (Prueba al freno)									
Freno		Motor tipo jaula de ardilla							
RPM	N-m	V_{RS} (V)	I_R (A)	P_{total} (Vatios)	Q_{total} (Vatios)	S (V-A)	Eficiencia	RPM	F.P.

5.7. Ensayo de temperatura (IEEE 112/1978 item 5.3 MET. 3)

Consiste el registrar la temperatura y el tiempo y tener la curva Temperatura vs Tiempo. El tiempo mínimo es 4 horas cuando la temperatura comienza a disminuir en 2°C durante las dos horas siguientes.

5.8. Compensación reactiva IEC 831 - item 1,2 y VDE 560 item 4

6. Aplicaciones industriales

Su construcción robusta e IPW adecuado hace que estos motores sean utilizados en ambientes agresivos tales como: las embarcaciones navieras, la industria textil, industrias químicas, etc. Teniendo en cuenta la categorización, sería muy importante y necesario hacer una buena selección del motor para lo cual el torque de la carga es la información base.

Las cargas más importantes son nominadas a continuación:

- Compresores de aire.
- Electroventiladores centrífugos y axiales pequeños, medianos y grandes.
- Máquinas que requieren de un arranque moderado.
- Electrobombas centrífugas.
- Fajas transportadoras.
- Cargas que cuenten con un torque bajo, medio y elevado.

7. Cuestionario

1. **Enumere y defina las características nominales de las máquinas rotativas de inducción jaula de ardilla. Presente las características de placa del motor utilizados en su experiencia.**

Son las características de funcionamiento de un motor de inducción cuando trabaja en el punto nominal y sus óptimas condiciones. Las podemos ver en la placa de características que llevan todos los motores.

Las principales características de los motores de C.A. son:

- **Potencia.** Es la rapidez con la que se realiza un trabajo; en física la Potencia = Trabajo/Tiempo, la unidad del Sistema Internacional para la potencia es el Joule por segundo, y se denomina Watt (W). Sin embargo estas unidades tienen el inconveniente de ser demasiado pequeñas para propósitos industriales. Por lo tanto se utilizan el kiloWatt (kW) y el caballo de fuerza (HP).

La diferencia de tensión es importante en la operación de una máquinas, ya que de esto dependerá la obtención de un mejor aprovechamiento de la operación. Los voltajes empleados más comúnmente son: 127 V, 220 V, 380 V, 440 V, 2300 V, 6000 V.

- **Tensiones nominales.** Son dos valores, el mayor para conectar en estrella y el menor para conectar en triángulo. Las tensiones son 400/230 V.
- **Velocidad nominal.** Es la velocidad de giro del rotor en el punto nominal. Es un valor alto próximo al sincronismo.
- **Potencia mecánica nominal.** Es la potencia que el motor entrega a la carga mecánica en forma de movimiento, cuando trabaja en el punto nominal. También se llama potencia útil, y se determina en cualquier punto de funcionamiento con la siguiente expresión:

$$P_{\text{mec}} = \frac{2\pi}{60} M N_r$$

Donde:

- P_{mec} : Potencia mecánica entregada a la carga (W).
- M : Par motor (N-m).
- N_r : Velocidad del motor (RPM).

Normalmente se expresa en caballos de vapor.

- **Corriente.** La corriente eléctrica (I), es la rapidez del flujo de carga (Q) que pasa por un punto dado (P) en un conductor eléctrico en un tiempo (t) determinado.
- **Corriente nominal.** En una máquina, el valor de la corriente nominal es la cantidad de corriente que consumirá en condiciones normales de operación.
- **Corriente de vacío.** Es la corriente que consumirá la máquina cuando no se encuentre operando con carga y es aproximadamente del 20 % al 30 % de su corriente nominal.
- **Corriente de arranque.** Todos los motores eléctricos para operar consumen un excedente de corriente, mayor que su corriente nominal, que es aproximadamente de dos a ocho veces superior.
- **Corriente a rotor bloqueado.** Es la corriente máxima que soportará la máquina cuando su rotor esté totalmente detenido.

2. ¿Cómo se invierte el sentido de giro de éste motor asíncrono y cuantas posibilidades existen de hacerlo? Hagas las conexiones que se han realizado.

Se consigue permutando dos líneas cualesquiera de los tres que alimentan al motor; con ello se logra cambiar el sentido de giro del campo magnético giratorio de estator, y por ende el giro del rotor.

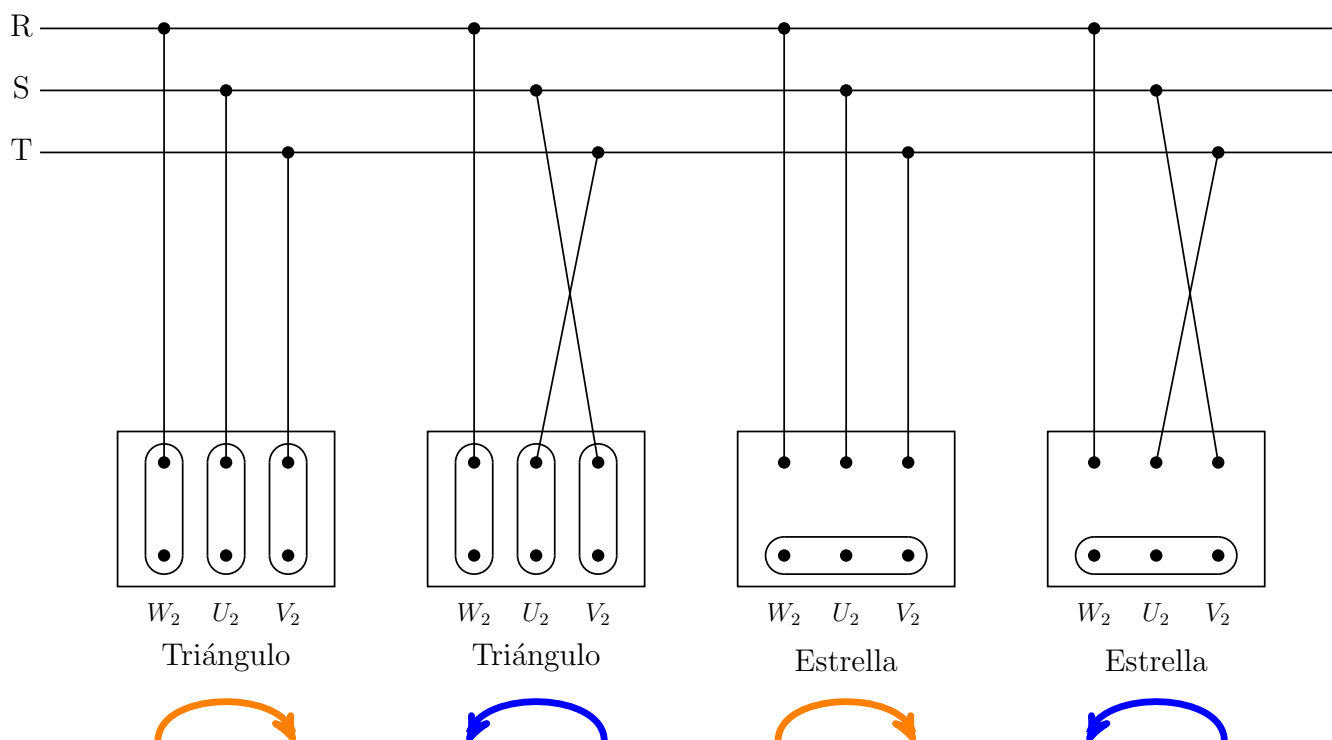


Figura 10: Conexiones realizadas

7. Elabore un formato de protocolo de pruebas que Ud. realizaría en las máquinas eléctricas tipo jaula de ardilla industrial.

TABLA N° 1.- RESISTENCIA DE AISLAMIENTO			
DEVANADO	TERMINALES	Raisl. (M Ω)	OBSERVACIONES
ESTATOR	U1 - MASA		
	V1 - MASA		
	W1 - MASA		

TABLA N° 2.- RESISTENCIA ÓHMICA POR FASE						
DEVANADO	TERMINALES	Rfase (Ω) *	Voltios	Amper.	Rfase (Ω) **	Tamb. (C°)
ESTATOR	U1 - U2					
	V1 - V2					
	W1 - W2					
* Utilizando un puente Wheatstone.						
* Utilizando una batería, voltímetro y amperímetro.						

TABLA N° 3.- PRUEBA DE VACÍO

V FASE (VOLTIOS)	I FASE (AMPERIOS)	P (VATIOS)	TORQUE N - m	Q (VARs)	VELOCID. RPM	COS θ

TABLA N° 4.- PRUEBA DE CORTO CIRCUITO (ROTOR BLOQUEADO)

V FASE (VOLTIOS)			I FASE (AMPERIOS)			P	Q	S	COS θ
RS	RT	ST	R	S	T	VATIOS	VARs	VOLT-AMP.	

TABLA N° 5.- PRUEBA CON CARGA (PRUEBA AL FRENO)

VRS VOL.	VST VOLT.	VRT VOLT.	IR AMP.	PINGR. VATIOS	PUTIL VATIOS	TORQUE N-m	VELOC RPM	EF (%)	COS θ

8. Recomendaciones

1. Al regular la corriente, el cambio debe ser entre 0.1 y 0.2 A. La máquina soporta hasta 0.6 A.
2. Se debe tener mucho cuidado y precaución en el empleo de los motores del laboratorio, para evitar el daño de los equipos y evitar accidentes.
3. Debe revisarse que se tenga el equipo necesario, adecuado y en buen estado antes de empezar la experiencia de laboratorio.
4. Revisar cuidadosamente que las conexiones estén bien realizadas.
5. Si la máquinas se calienta mucho, dejar de operar por algunos minutos hasta que se enfríe hasta la temperatura ambiente.

9. Conclusiones

1. La impedancia del motor disminuye cuando aumentamos la corriente, dado que el voltaje disminuye, por lo tanto varía la impedancia.
2. Conforme se aumenta la intensidad de corriente en la prueba de carga, aumenta el factor de potencia y el torque; sin embargo, la velocidad angular disminuye junto con la fuerza electro-motriz.
3. La potencia aumenta cuando la corriente incrementa.
4. La resistencia del vacío es pequeña comparada con la reactancia.

Anexos

Simulando con parámetros coherentes a los posibles obtenidos en el laboratorio, es posible responder las preguntas 3-6 del cuestionario:

- Realice todos los cálculos necesarios que le conduzca a construir el diagrama equivalente monofásico valorado, referido al estator con los valores registrados y calculados en los ensayos realizados en el laboratorio.

■ Prueba de vacío.

Prueba de vacío					
V (fase)	I (fase)	P (Vatios)	Torque (N-m)	fdp ($\cos \phi$)	RPM
392	0.22	30.45	0	0.35	3580
338	0.19	26.48	0	0.41	3580
300	0.17	22.26	0	0.44	3570
270	0.14	18.34	0	0.56	3550

Cuadro 1: Datos obtenidos en la prueba de vacío

$$Z_0 = \frac{V_0}{I_0} = \frac{409,8 \text{ V}}{0,23} = 1781,73913 \Omega$$

$$R_0 = \frac{P_0}{I_0^2} = \frac{27 \text{ W}}{0,22716^2} = 523,25 \Omega$$

$$\cos \phi = \frac{R_0}{Z_0} = \frac{523,25}{1781,73} = 0,293675$$

Aplicando el proceso para todos los valores:

Prueba de vacío				
Z (V/I) Ω	R (Ω)	X (Ω)	$\cos \phi$ calculado	$\cos \phi$ medido
1781.81818	629.13223	1667.053889	0.35308	0.35
1778.947368	733.518	1620.68	0.41233	0.41
1764.70588	770.24221	1587.7386	0.43647	0.44
1928.571428	935.714286	1686.36488	0.4851852	0.56

Cuadro 2: Datos calculados de la prueba de vacío

■ Prueba de cortocircuito.

Prueba de cortocircuito			
V (fase)	I (fase)	P (Vatios)	fdp ($\cos \phi$)
60.4	0.34	15.22	0.729
99.1	0.55	40.17	0.73
143.7	0.81	85.9	0.749
175.7	0.99	130	0.745

Cuadro 3: Datos de la prueba de cortocircuito

■ Prueba de carga

Prueba de carga					
V (fase)	I (fase)	P (Vatios)	Torque (N-m)	fdp ($\cos \phi$)	RPM
391	0.24	50.8	0.43	0.54	3560
390.7	0.32	98.4	0.79	0.784	3490
387.4	0.47	160.5	1.23	0.885	3410
388	0.53	184.5	1.38	0.9	3370
386	0.64	225.4	1.63	0.92	3300
383.8	0.79	281.12	1.94	0.927	3190
385.3	0.86	306.66	2.07	0.93	3120
380.6	1.02	350.00	2.15	0.91	2980

Cuadro 4: Datos de la prueba de carga

4. Grafique las curvas de vacío y corto circuito de la máquina de prueba.

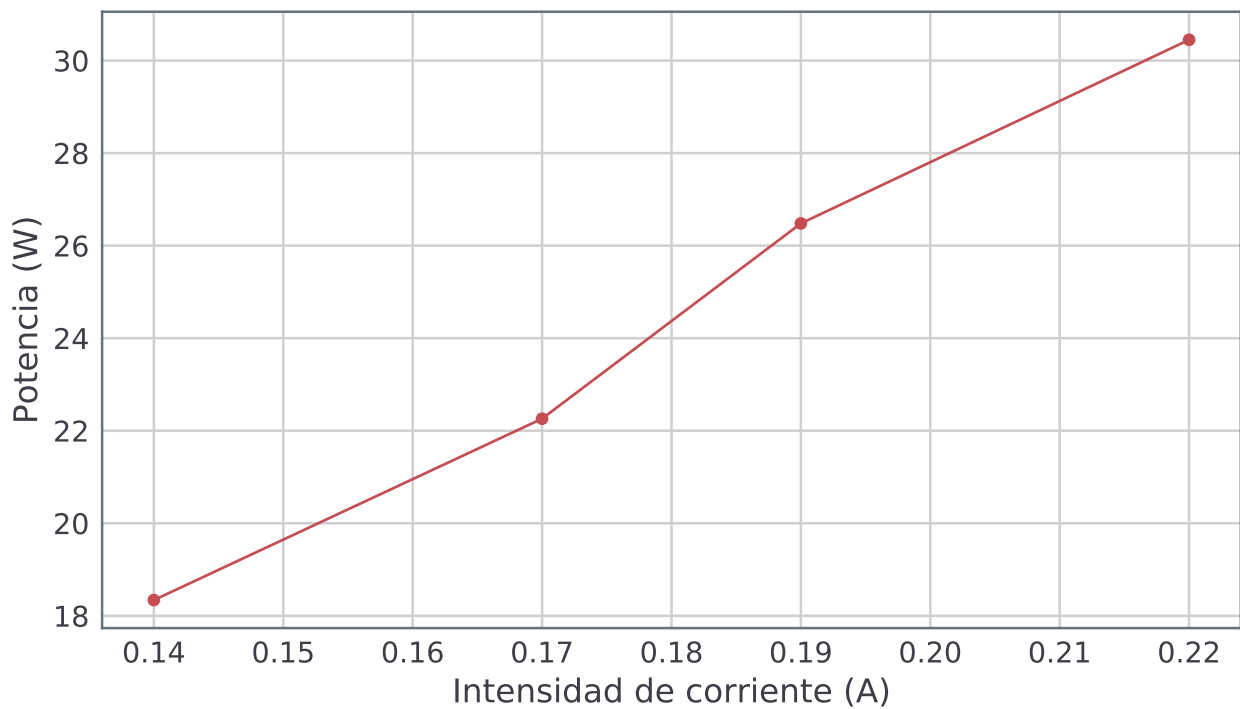


Figura 11: Ensayo de vacío - P vs I

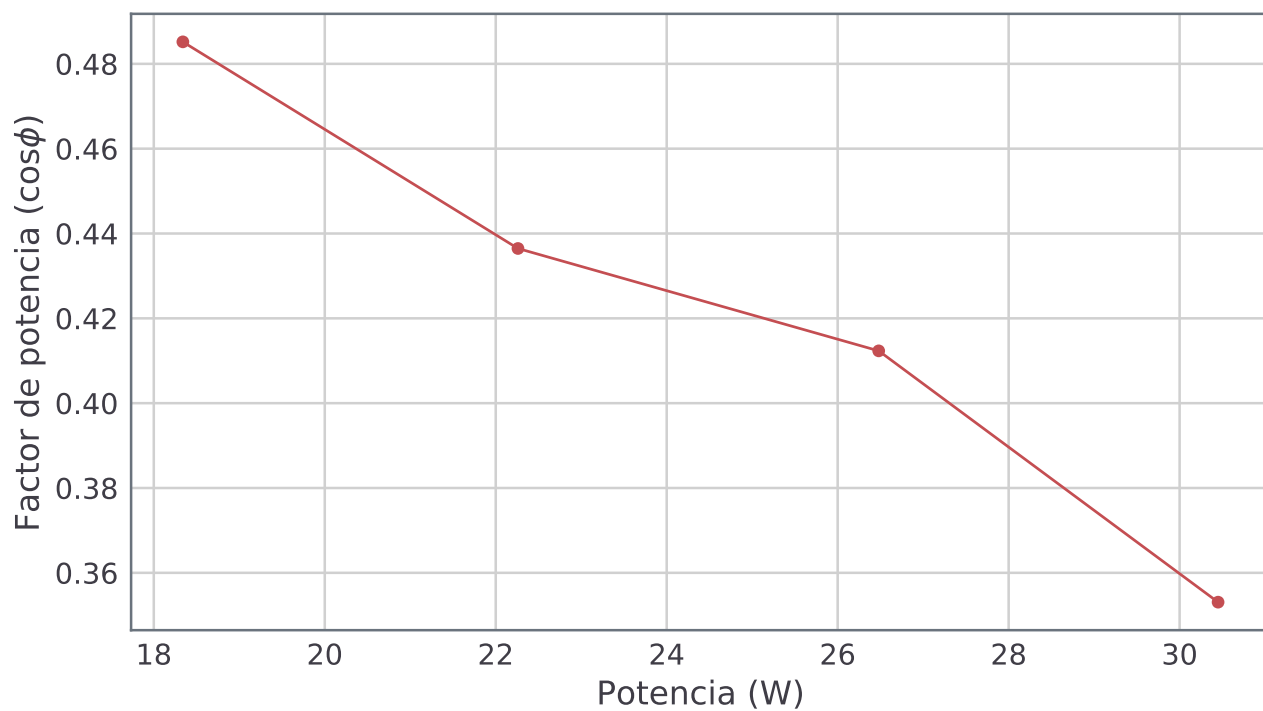


Figura 12: Ensayo de vacío - fdp vs P

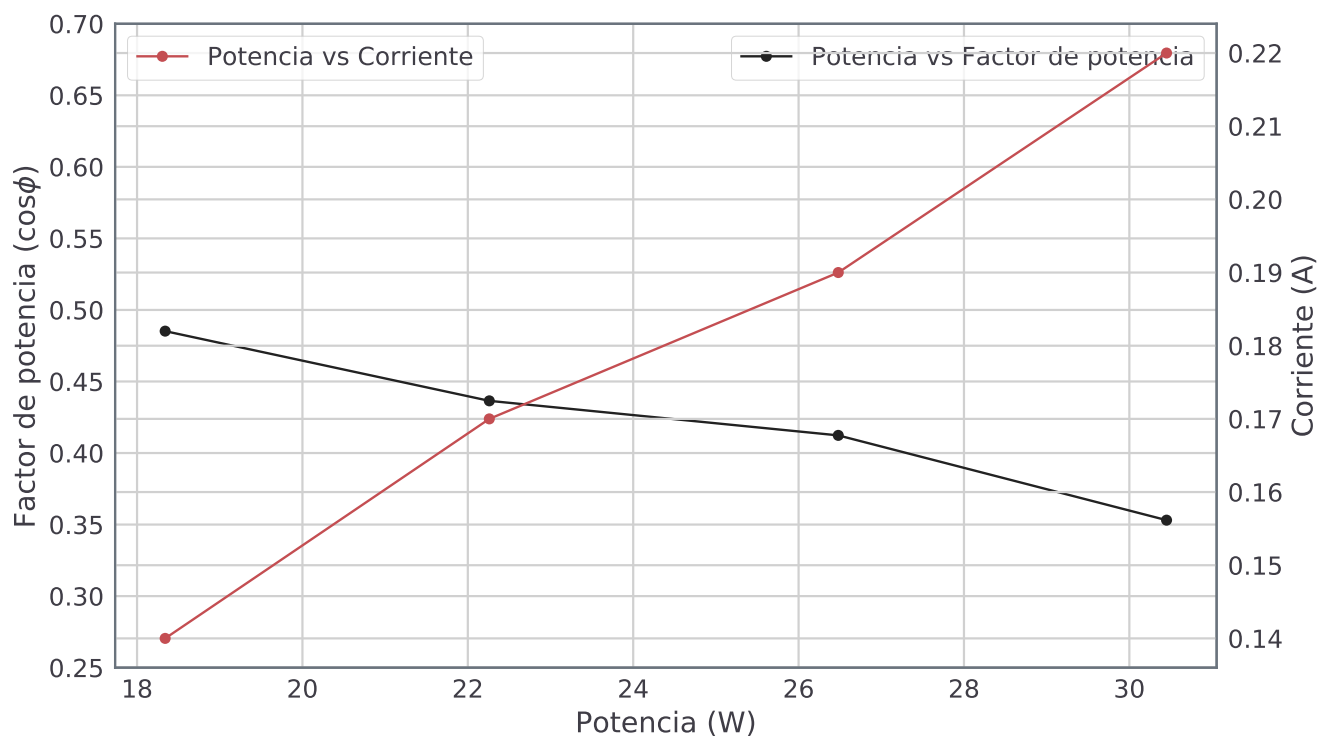


Figura 13: Ensayo de vacío

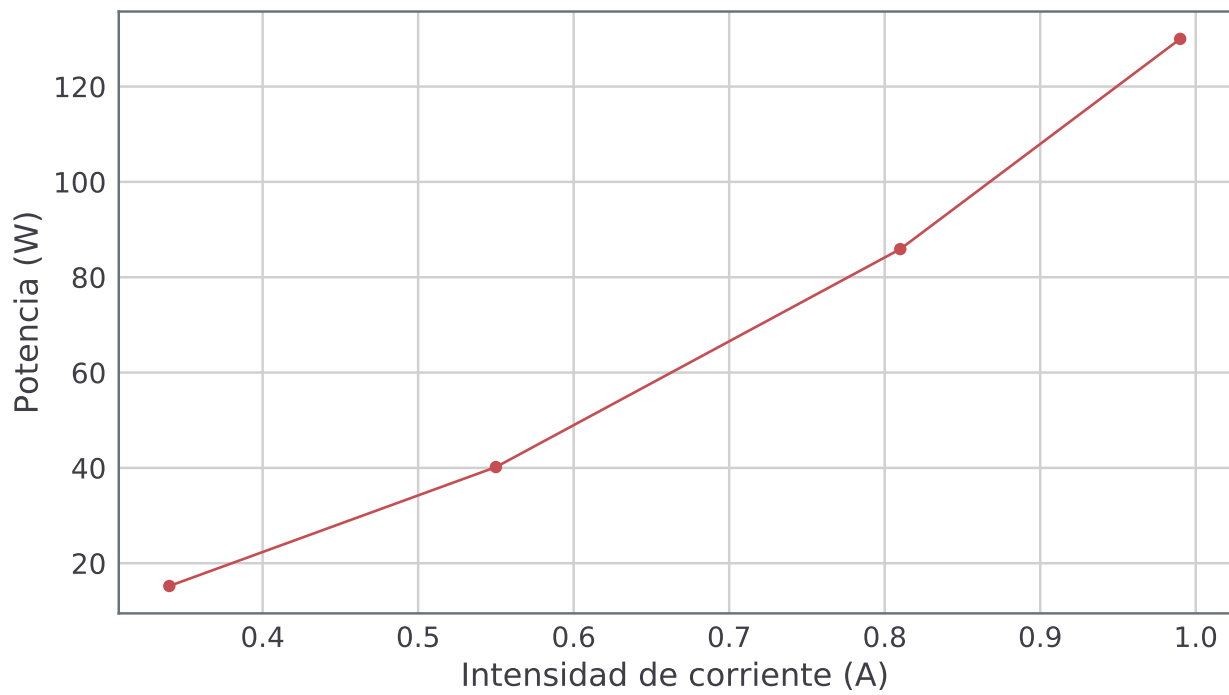


Figura 14: Ensayo de cortocircuito - P vs I

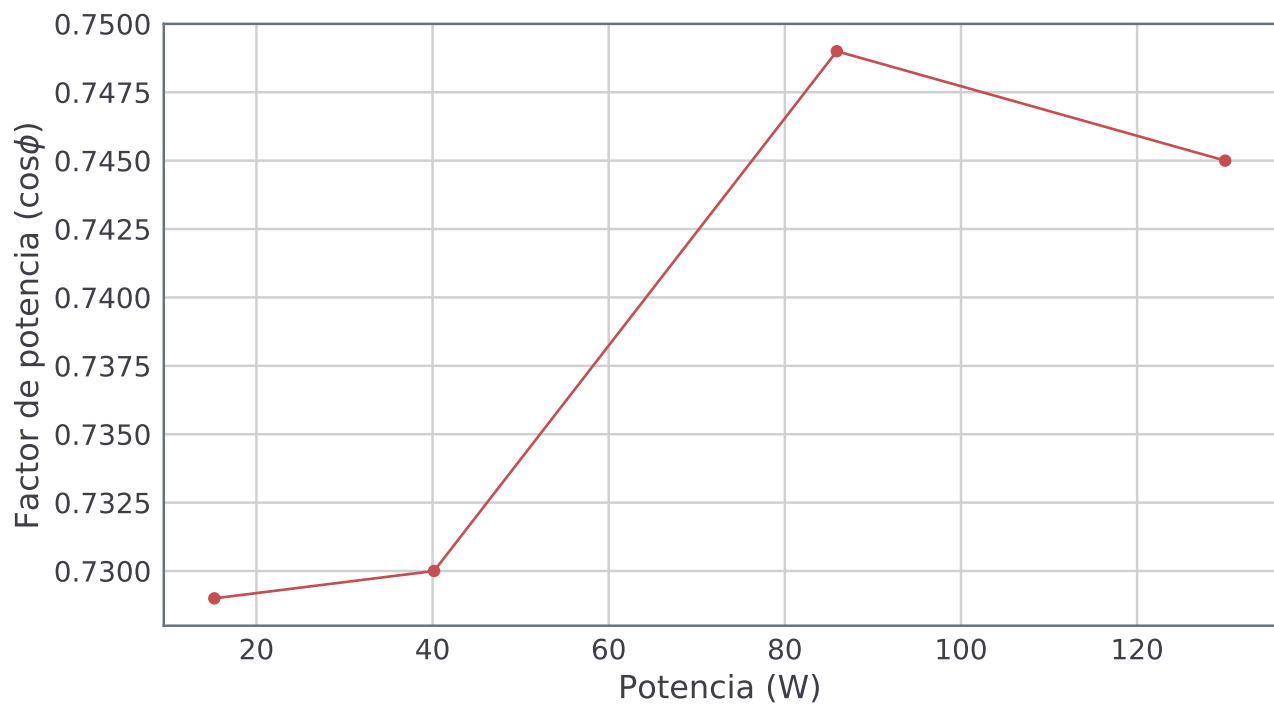


Figura 15: Ensayo de cortocircuito - fdp vs P

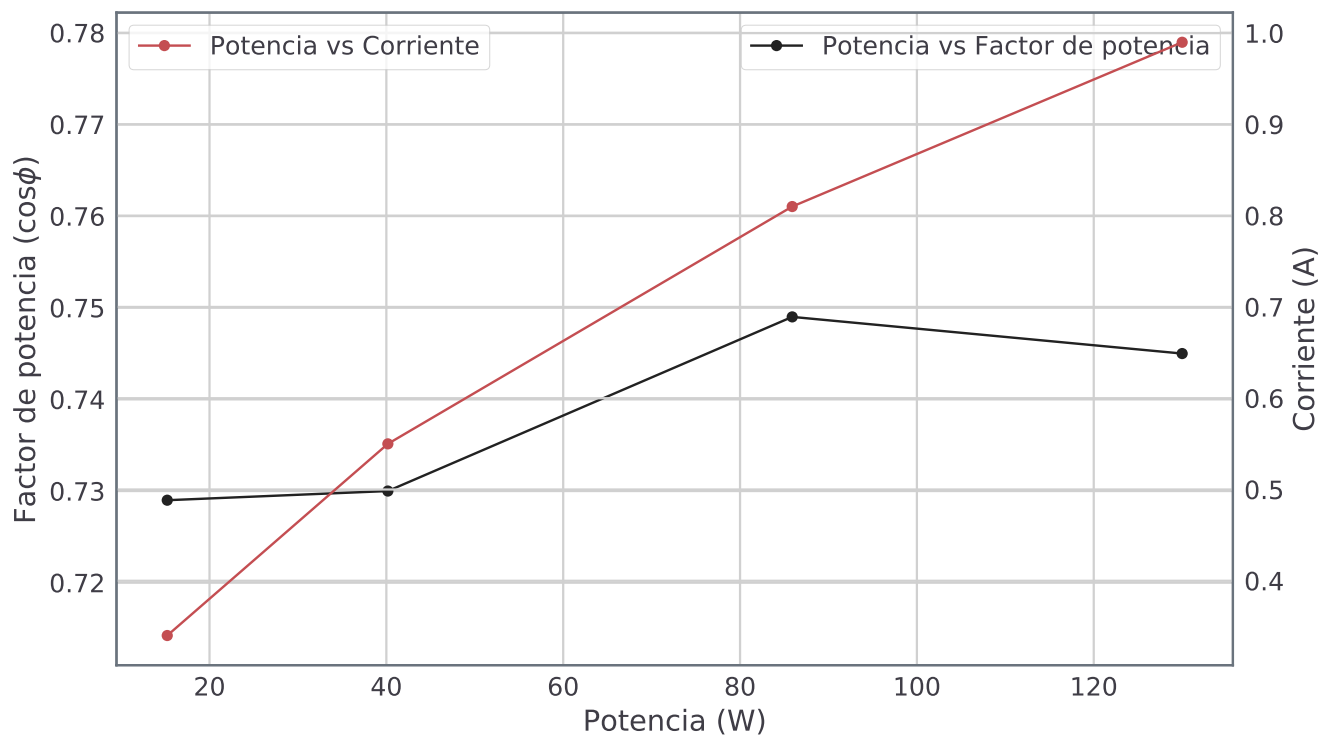


Figura 16: Ensayo de cortocircuito

5. Grafique las curvas P_{nucleo} vs I_1 , T , EF, FP vs velocidad.

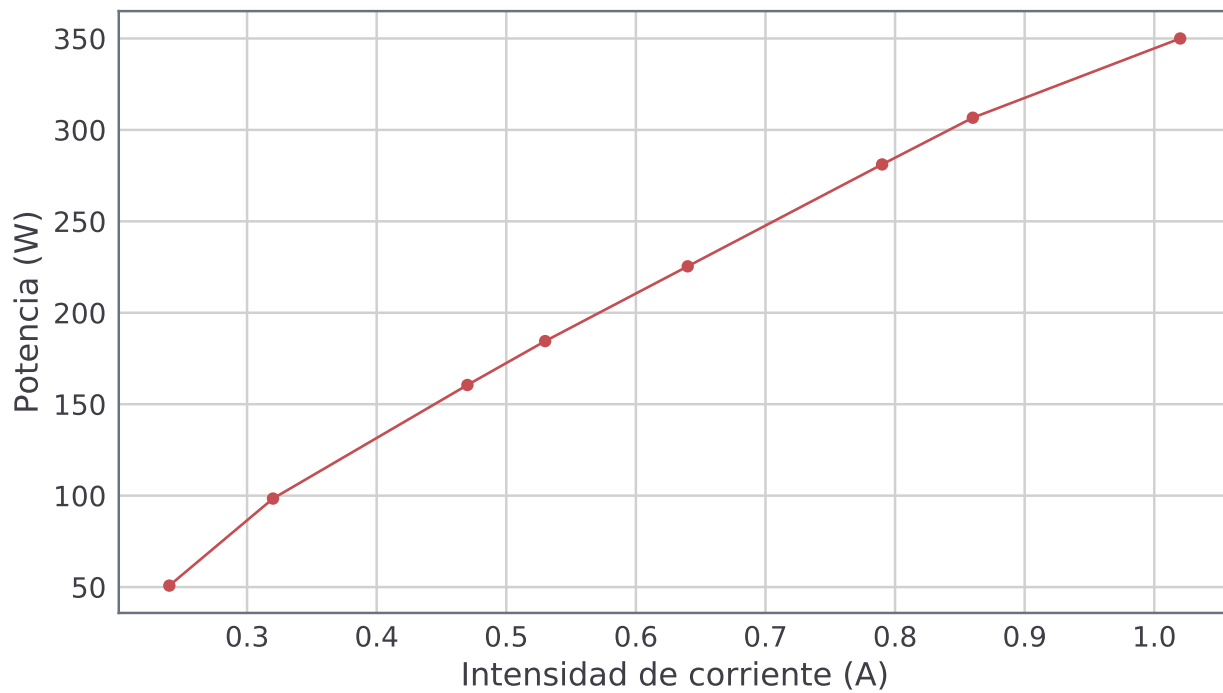


Figura 17: Ensayo de carga - P vs I

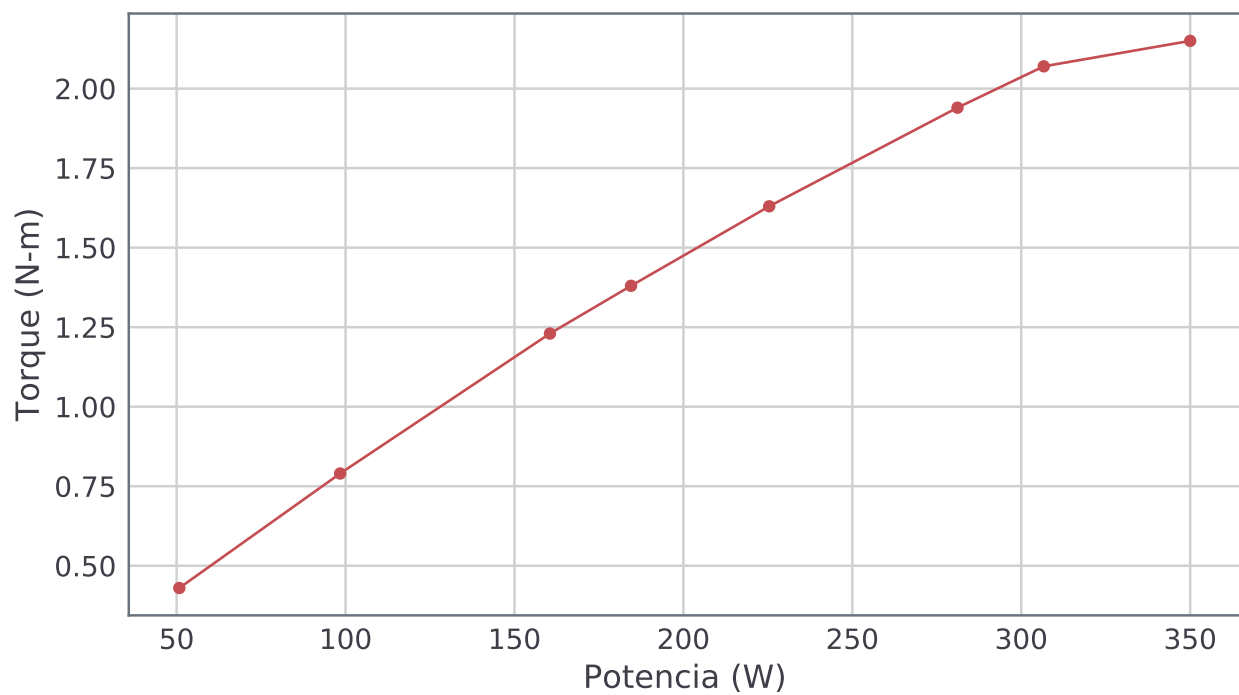


Figura 18: Ensayo de carga - T vs P

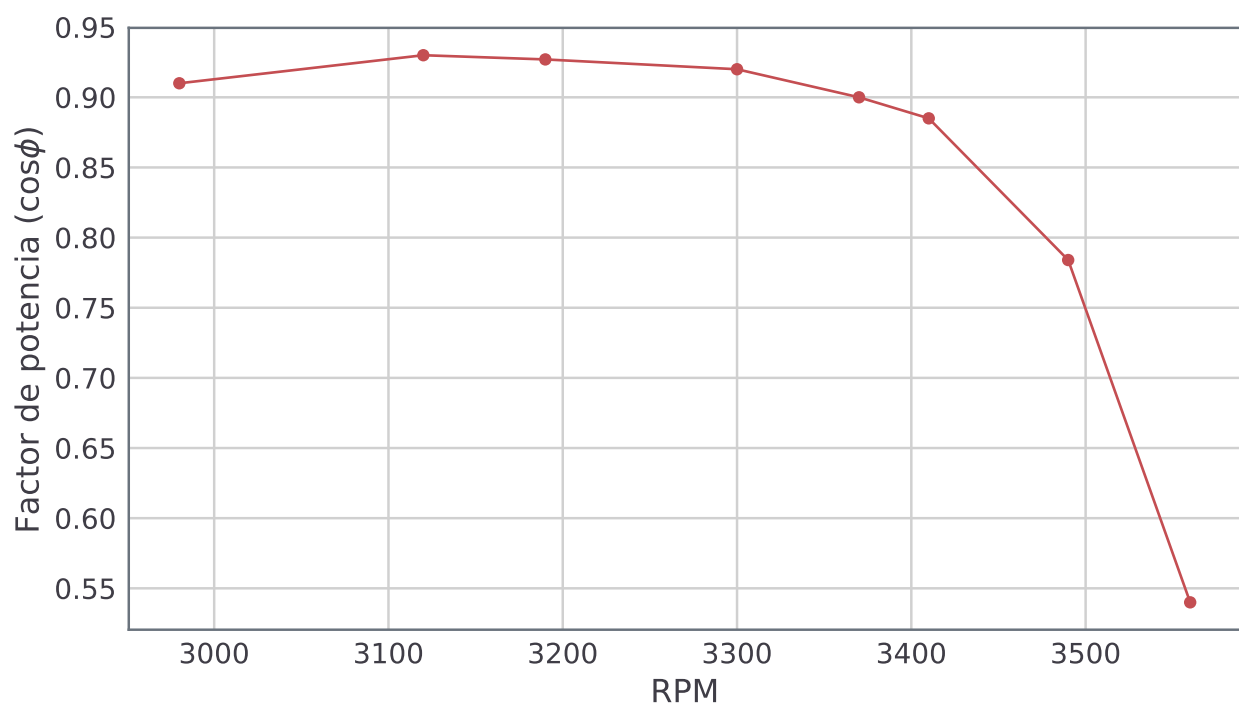


Figura 19: Ensayo de carga - fdp vs RPM

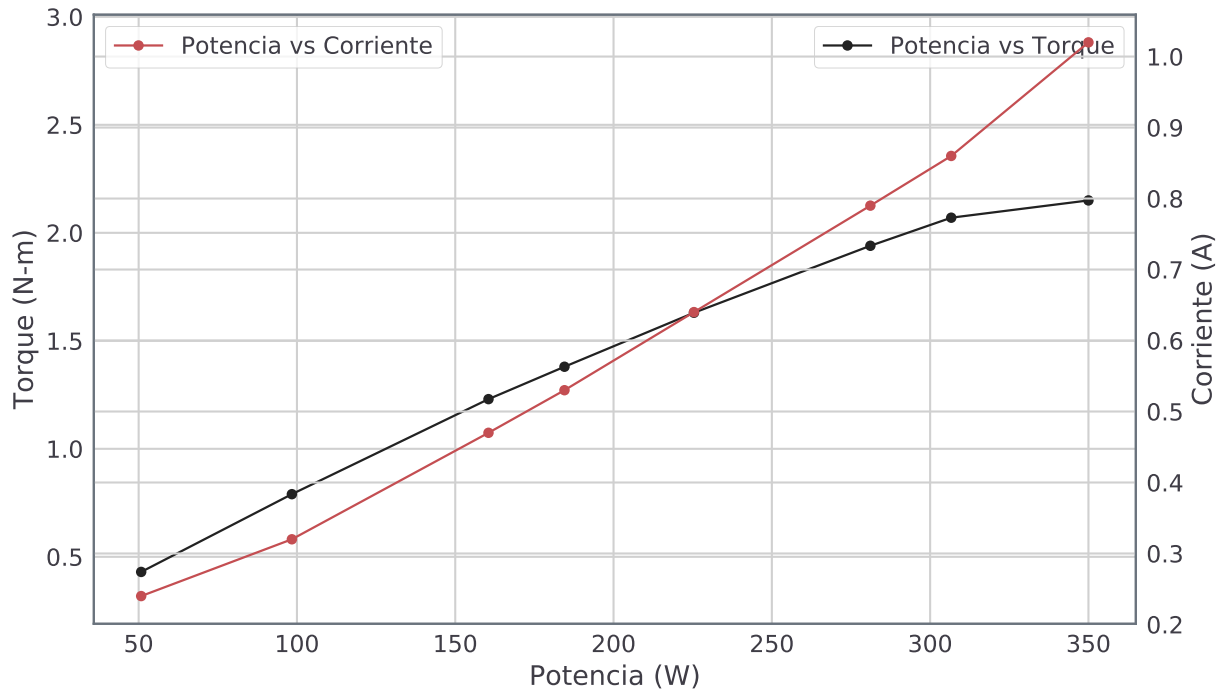


Figura 20: Ensayo de cortocircuito

6. Determinar las pérdidas rotacionales del motor probado.

Se sabe que:

$$P_{\text{desarrollada}} = 3 \frac{V_1 I \times \text{fdp} \times \text{EF}}{1000}$$

$$P_{\text{desarrollada}} = P_{\text{util}} + P_{\text{m}}$$

$$P_{\text{rotacional}} = P_{\text{fe}} + P_{\text{mec}}$$

P_{mec}								
Torque (N-m)	RPM	V_1 (V)	I (A)	FDP	EF (%)	P_{desarr} (W)	P_{util} (W)	P_{mec} (W)
0.46	1150	267	1.29	0.808	86.43	72.1602	55.3967	16.7635
0.42	1160	267.7	1.24	0.814	83.09	67.3541	51.0194	16.3347
0.34	1190	267.8	1.17	0.807	77.45	58.7506	42.3696	16.3810
0.33	1200	268.8	1.15	0.808	73.96	55.4187	41.4690	13.9497

Cuadro 5: Datos calculados para P_{mec}

Pérdidas rotacionales ($P_{\text{rotacional}}$)			
I_{fase} (A)	P_{fe} (W)	P_{mec} (W)	$P_{\text{rotacional}}$ (W)
1.29	706.2978	16.7635	689.5343
1.24	710.0061	16.3347	693.6714
1.17	710.5367	16.3810	694.1557
1.15	715.8531	13.9497	701.9034

Cuadro 6: Datos calculados para $P_{\text{rotacional}}$

Para el ploteo de las gráficas y el cálculo de los parámetros se utilizó las siguientes piezas de código para verificar que los datos elegidos sean coherentes con lo explicado en la teoría:

Código 1: Prueba de vacío

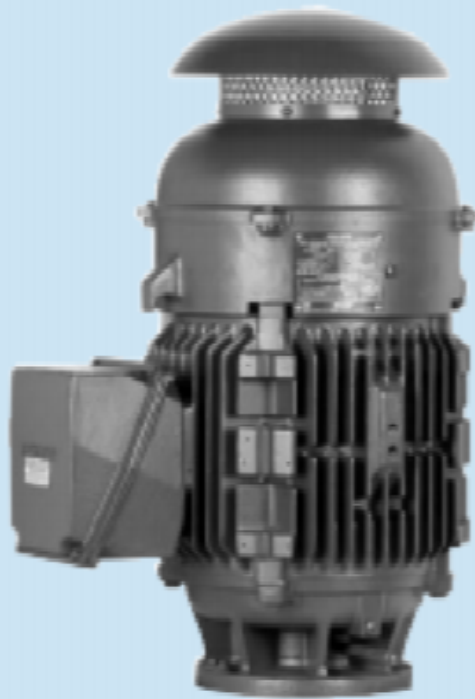
```
1 V = np.array([392,338,300,270])
2 I = np.array([0.22,0.19,0.17,0.14])
3 P = np.array([30.45,26.48,22.26,18.34])
4 fdp = np.array([0.35,0.41,0.44,0.56])
5 RPM = np.array([3580,3580,3570,3550])
6 #  $Z = \frac{V}{I}$ 
7 Z = V/I
8 #  $R = \frac{P}{I^2}$ 
9 R = P/(I*I)
10 #  $Z^2 = R^2 + X^2 \rightarrow X = \sqrt{Z^2 - R^2}$ 
11 X = np.sqrt(Z*Z-R*R)
12 #  $\cos(\phi) = \frac{R}{Z}$ 
13 _fdp = R/Z
```

Código 2: Prueba de cortocircuito

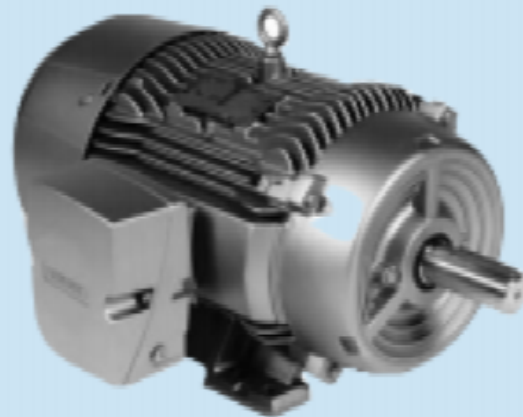
```
1 V = np.array([60.4,99.1,143.7,175.7])
2 I = np.array([0.34,0.55,0.81,0.99])
3 P = np.array([15.22,40.17,85.9,130])
4 _fdp = np.array([0.729,0.73,0.749,0.745])
```

Código 3: Prueba de carga

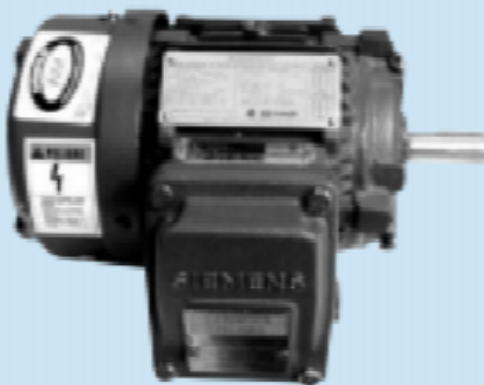
```
1 V = np.array([391,390.7,387.4,388,386,383.8,385.3,380.6])
2 I = np.array([0.24,0.32,0.47,0.53,0.64,0.79,0.86,1.02])
3 P = np.array([50.8,98.4,160.5,184.5,225.4,281.12,306.66,350.00])
4 T = np.array([0.43,0.79,1.23,1.38,1.63,1.94,2.07,2.15])
5 _fdp = np.array([0.54,0.784,0.885,0.9,0.92,0.927,0.93,0.91])
6 RPM = np.array([3560,3490,3410,3370,3300,3190,3120,2980])
7 Rfe = 3*V*V/P
```

Motor vertical flecha hueca



**Nuevo motor NEMA
motor GP10
Uso General**



**Motor trifásico a prueba
de explosión**



**Motor trifásico abierto
armazón 56**

Bibliografía

- [1] Huaman L., Floren A. y Guadalupe, E. “Guía de laboratorio de máquinas eléctricas”. *Universidad Nacional de Ingeniería*.
- [2] Fitzgerald, A. E. y Kingsley, C. “Teoría y análisis de las máquinas eléctricas”. *Mac Graw Hill*.
- [3] Chapman, Stephen J. “Máquinas eléctricas”. *Mac Graw Hill*.
- [4] Wildi, T. “Máquinas eléctricas y sistemas de potencia”. *Prentice Hall*.
- [5] Shult, George P. “Transformer and motors”. *A division of Prentice Hall Computer 11711*.
- [6] Kosow, Irving L. “Máquinas eléctricas y transformadores”. *Prentice Hall Inc 1991*.
- [7] Richardson, Donald V. y Caisse, Arthur J. “Rotating electric machinery and transformer technology”. *Prentice Hall Inc 1998*.
- [8] Salvador, M. G. “Máquinas eléctricas estáticas - teoría y problemas”. *Salvador Editores*.
- [9] Gutiérrez, A. “Teoría y análisis de máquinas eléctricas”.
- [10] Fraile M., J. “Máquinas eléctricas”. *Mac Graw Hill*.
- [11] Hiziroglu, G. “Máquinas eléctricas y transformadores”. *Oxford University Press*.