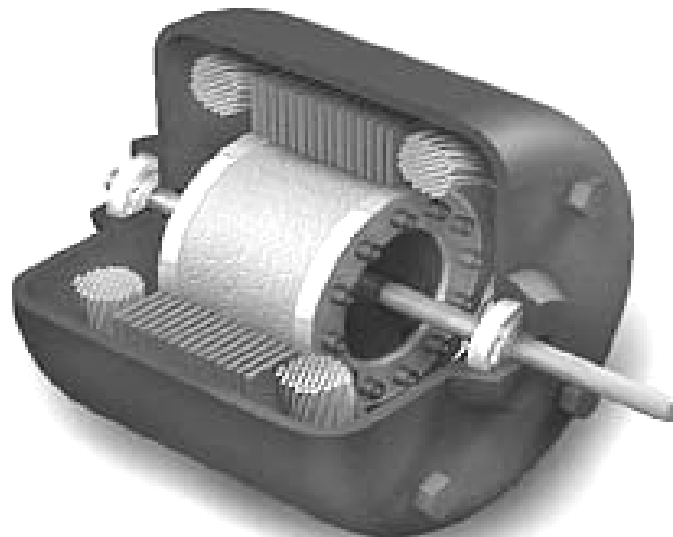
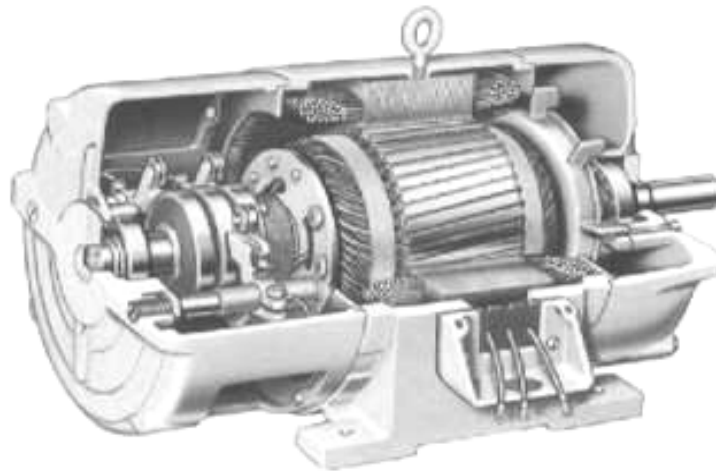
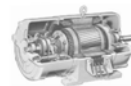


ANEXO N° 2 MOTORES ASINCRONOS

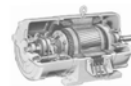


Marino A. Pernía C.



CONTENIDO

1. MAQUINAS ELECTRICAS. GENERALIDADES.	
1.1 Definiciones y clasificación.....	3
1.2 Constitución general de una máquina eléctrica.....	3
1.3 Circuito magnético de las máquinas	3
1.4 Número de polos de las máquinas.....	4
1.5 Eje de polo y línea neutra.....	5
1.6 Perdidas de potencia en las máquinas	5
2. ASPECTOS CONSTRUCTIVOS DE EL MOTOR DE INDUCCIÓN	
2.1 Partes principales de las máquinas de Inducción.....	6
2.2 Estator.....	6
2.3 Maquina de Inducción (rotor bobinado).....	7
2.4 Motor de inducción con rotor de Jaula de Ardilla.....	9
2.5 Motor de rotor de doble jaula	10
2.6 Clasificación NEMA de los motores de inducción.....	12
3. EL MOTOR DE INDUCCIÓN. FUNCIONAMIENTO	
3.1 Generalidades.....	16
3.2 La máquina asíncrona funcionando como motor.....	17
3.3 El deslizamiento.....	18
3.4 El motor funcionando en vacío	19
3.5 El motor funcionando a media carga	20
3.6 El motor funcionando a plena carga.....	20
3.7 El motor funcionando mas allá de plena carga	20
3.8 Analogía con los transformadores.....	20
4. CIRCUITO EQUIVALENTE DEL MOTOR DE INDUCCION	22
4.1 Prueba en vacío, sin carga a rotor libre	23
4.2 Prueba a rotor bloqueado.....	27
5. ARRANQUE DE LOS MOTORES DE INDUCCION.	
5.1 Arranque directo	28
5.2 Arranque a tensión reducida por autotransformador	30
5.3 Arranque agregando resistencia en serie al estator.....	30
5.4 Arranque estrella-triángulo	31
5.5 Arranque agregando resistencias al rotor	32
5.6 Arrancadores electrónicos.....	33



I. MÁQUINAS ELÉCTRICAS. GENERALIDADES

I.1 - Definición y clasificación.

Sistema de mecanismos capaz de producir, transformar o aprovechar la energía eléctrica.

Se clasifican en tres grandes grupos:

- **Generadores:** Son máquinas que transforman la energía mecánica en eléctrica, como las dinamos (c.c), y los alternadores (c.a).
- **Motores:** Transforman energía eléctrica en mecánica, los hay de corriente continua, asíncronos, síncronos, etc.
- **Transformadores y convertidores:** Son máquinas que conservan la forma de energía eléctrica, pero transforman sus características.

I.2. Constitución general de una máquina eléctrica.

- Electromagnético.
- Mecánico.

Desde el punto de vista electromagnético:

- Toda máquina eléctrica está provista de un conjunto magnético y dos circuitos eléctricos, uno de los circuitos, es el de excitación, que al ser recorrido por una corriente eléctrica produce amperios vueltas necesarios para crear el flujo que se establece en el conjunto magnético de la máquina.

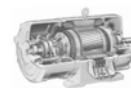
Desde el punto de vista mecánico:

- Máquinas rotativas: Están provista de partes giratorias como la dinamo, los alternadores, motores, etc. Tienen una parte fija llamada estator y otra móvil llamada rotor, entre ambas partes hay un espacio de aire llamado entrehierro.
- Máquinas estáticas: No disponen de partes móviles, como el transformador.

I.3 -Circuito magnético de las máquinas.

Es heterogéneo. Está constituido de varias partes perfectamente distinguibles, sea por estar formada por materiales férricos diferentes ó por estar sometidas a inducciones de distinto valor y el entrehierro. Siendo diferentes según se trate de máquinas estáticas o rotativas.

Las máquinas estáticas presentan un circuito magnético constituido por dos columnas y dos culatas. Rodeando a las columnas van dispuestos los dos



circuitos eléctricos el de AT y el de BT que se conectan a las redes de corriente alterna de AT y BT, motivo por el que en el circuito magnético, se establece un flujo de sentido alternativo y valor variable.

En las rotativas la construcción de los circuitos magnéticos está basada en electroimanes, a los que se les da el nombre de polos. Los polos pueden ser salientes o lisos.

Polos salientes: Son núcleos de hierro unidos sólidamente a la culata rodeados por bobinas que al ser recorridas por una corriente eléctrica, originan un flujo que magnetiza la masa de hierro, creando en sus extremos los polos correspondientes. En estas máquinas se completa el circuito magnético con otra parte metálica llamada armadura que está provista de ranuras en las que va alojada el segundo circuito eléctrico.

Dentro de las máquinas de polos salientes se distinguen dos tipos:

- Aquellas en las cuales los polos salientes pertenecen a la parte fija o estática, siendo la forma típica de las dinamos y de los motores de cc.
- Aquellas en las cuales los polos salientes pertenecen a la parte móvil, en las que giran los polos, la culata y el eje juntos formando una rueda polar, siendo la forma típica de los alternadores y motores síncronos.

Polos lisos: Construcción típica de motores asíncronos y turbo alternadores. En las máquinas de polos lisos en el conjunto magnético no existen partes salientes. En estas máquinas se forman zonas por las cuales sale el flujo desde la culata (Polo Norte) o entra en ella después de recorrer la armac

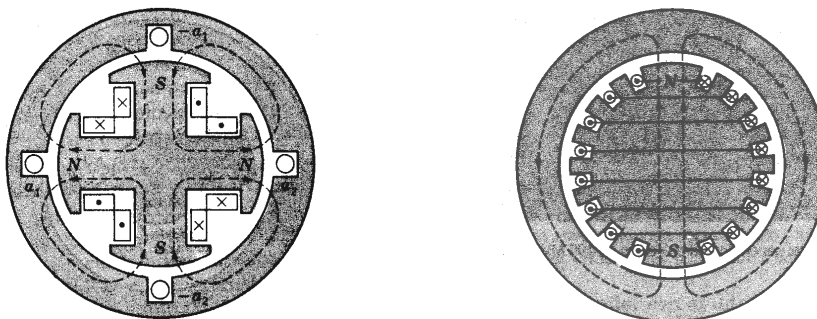
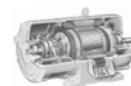


Figura N° 1. Máquinas; de polos salientes y de polos lisos o cilíndricos

1.4 -Número de polos de las máquinas.

En todo circuito magnético se distinguen polos Norte, zonas por donde salen las líneas de fuerza del flujo, y polos Sur, zonas por donde entran estas líneas de fuerza.

Para la correcta distribución de las líneas de fuerza es totalmente necesario, que los polos sean alternativamente de polaridad contraria, siendo



la mitad de ellos de polaridad Norte y la otra mitad Sur. La letra p designa el número de polos. Las máquinas se clasifican, de acuerdo con el número de polos que entran en ella, bipolares (2 polos) $p=2$, tetrapolares (4 polos) $p=4$.

1.5 -Eje de polo y línea neutra.

El eje de polo es un plano radial que pasa por el eje de simetría geométrica del polo. Para conseguir una construcción correcta de las máquinas rotativas, es preciso que los ángulos geométricos formados por los ejes de dos polos consecutivos sean iguales.

Línea neutra, resultan compensados en ella los efectos magnéticos por quedar equidistante entre dos polos vecinos que son de nombre contrario.

1.6. Pérdidas de potencia en las máquinas

1.6.1 -Generalidades.

En toda máquina parte de la energía absorbida se convierte en calorífica, perdiéndose para el efecto útil que se desea conseguir. Como consecuencia, la potencia útil es siempre menor que la potencia absorbida. Esta energía absorbida pero no aprovechada en el efecto *útil*, recibe el nombre de potencia perdida.

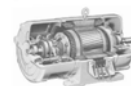
1.6.2 Clases de pérdidas de potencia:

- Potencia perdida en el hierro del circuito magnético (Histéresis, Foucault).
- Potencia perdida en los conductores que forman los circuitos eléctricos.
- Pérdidas mecánicas a causa de los rozamientos y ventilación, en máquinas rotativas

Para reducir la potencia perdida por histéresis se emplean chapas magnéticas sometidas a un adecuado proceso de recocido.

Para reducir la pérdida de potencia por corrientes parasitarias o de Foucault es conveniente que las partes del circuito magnético, recorridas por un flujo variable, estén constituidas por un cierto número de chapas de hierro de poco espesor (0,5mm en las máquinas rotativas y 0,35mm en los transformadores) convenientemente aisladas entre sí por medio del propio óxido de las chapas, papel o barniz aislante.

Al efectuar el montaje del núcleo magnético, es imprescindible disponer de las chapas de manera que queden en planos paralelos a la dirección del flujo ó en planos perpendiculares al eje del rotor cuando se trate de máquinas rotativas.



1.6.3 Pérdidas en los circuitos eléctricos. Materiales empleados.

En la construcción de los circuitos eléctricos de las máquinas, son casi exclusivamente empleados el cobre y el aluminio.

El cobre es el conductor por excelencia, debe ser purificado por electrólisis, puede ser duro o recocido. El cobre duro se emplea en trabajos en los que es preciso que el conductor tenga cierta resistencia mecánica, el recocido se emplea en bobinados que han de sufrir cambios de forma, sea a mano o a máquina.

El aluminio es de uso más limitado en las máquinas eléctricas por tener una resistividad más elevada que la del cobre, queda bastante reducida la potencia útil de la máquina. Pero es el material casi exclusivamente empleado en las jaulas del rotor de los pequeños motores asíncronos de corriente alterna.

2. ASPECTOS CONSTRUCTIVOS DE LOS MOTORES ASINCRONOS

2.1. Partes principales de las máquinas de inducción

En todo motor eléctrico podemos distinguir dos partes principales: rotor y estator. El rotor está fijado a un eje e introducido dentro del estator mediante rodamientos, de forma que puede girar libremente.

Una máquina de inducción está constituida por un estator y un rotor montado en cojinetes y separado del estator por un entrehierro.

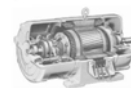
Electro-magnéticamente el estator está formado por un núcleo ranurado, en el cual se alojan conductores, estos conductores se interconectan de cierta manera y constituye el devanado de armadura.

En una máquina de inducción existen dos tipos de rotores:

- rotor liso
- rotor devanado

Un rotor liso o jaula de ardilla de un motor de inducción consiste en una serie de barras conductoras colocadas dentro de unas ranuras hechas en la superficie del rotor con sus extremos puestos en cortocircuito por medio de anillos.

El otro tipo de rotor es el de rotor devanado, que tiene un arrollamiento trifásico completo que es una imagen reflejada del devanado del estator, las tres fases del arrollamiento de este rotor usualmente se conectan en estrella y sus extremos se conectan a unos anillos rozantes montados en el eje, los devanados del rotor se pueden poner en cortocircuito a través de un conjunto de escobillas que están en contacto con los anillos rozantes, también se pueden insertar resistencias exteriores en el circuito del rotor.



2.2 Estator:

Está formado por un devanado de cobre trifásico arrollado a un núcleo de hierro laminado, se encarga de generar el campo magnético (ver figura 2).

En el motor de inducción el devanado del estator es esencialmente igual al devanado de una máquina síncrona. Sin embargo, el devanado del rotor está en cortocircuito eléctrico y con frecuencia no tiene conexiones al exterior; las corrientes se inducen en él por la acción de transformador procedente del devanado del estator.

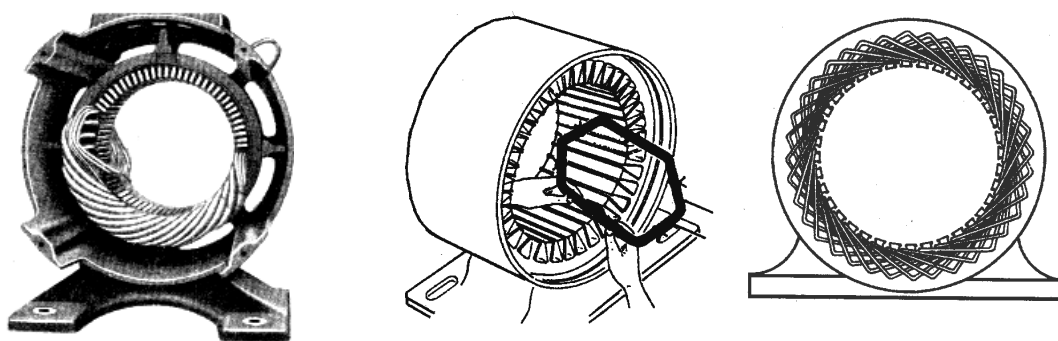


Figura N° 2. Estator de un motor de inducción

El estator se construye con acero perforado y montado como un cilindro hueco, la parte interior es un armazón de hierro fundido o aluminio (ver figura 2). Unas bobinas distribuidas en tres fases se distribuyen en las ranuras del interior de la circunferencia.

Cada una de las tres bobinas del estator tiene dos mitades, colocadas en posiciones diagonalmente opuestas respecto al estator. Las bobinas estén desfasadas 120° entre sí. El sentido de arrollamiento de las bobinas es tal que, cuando la corriente pasa a través de ellas, se induce un campo magnético a través del rotor.

2.3 Máquina de inducción (rotor bobinado):

A la vista de un Motor de Rotor Bobinado reconocemos, figura N° 3:

- Al desarmar la máquina nos encontramos con 2 piezas principales, una llamada estator que es un devanado de cobre arrollado en una pieza de hierro, este se encarga de generar el campo magnético giratorio del motor (C.M.G). Ver figura N° 2
- La otra es un devanado de cobre arrollado sobre otro núcleo de hierro, Ver Fig N° 3

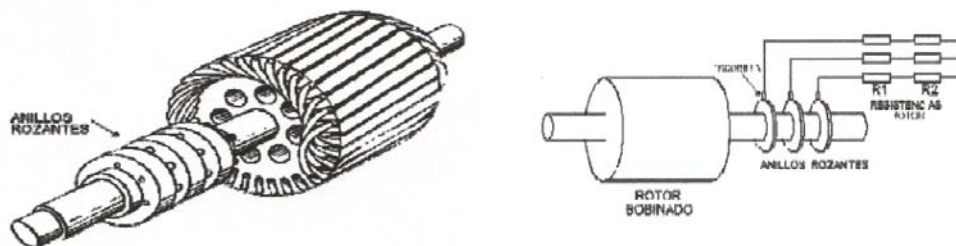
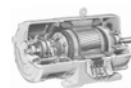


Figura N° 3 Rotor Bobinado de un motor de inducción

- un eje giratorio,
- un par de cojinetes
- unas placas de cobre llamadas anillos rozantes.
- Una barra de hierro llamarla Eje, que es el encargado de mover la carga mecánica. Ver figura 4
- Una caja de terminales o bornera, en donde se procede a inyectar tensión al motor, nos da la posibilidad de poder conectar sus devanados en dos distintas configuraciones; en Triangulo o Delta y en Estrella.
- Una placa de metal por un lado que nos indica los parámetros nominales de funcionamiento del motor.

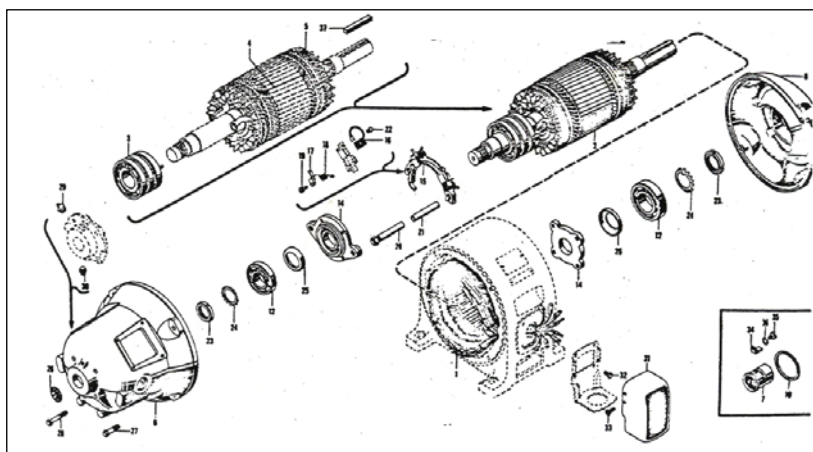
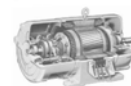


Figura N° 4 Despiece de un motor de inducción de rotor devanado

En este tipo de motores, en el rotor se introduce un bobinado trifásico, el bobinado del rotor se puede conectar al exterior por medio de escobillas y anillos rozantes. Este tipo de motores pueden tener resistencias exteriores colocadas en el circuito del rotor, lo que permite reducir la corriente absorbida, reduciendo la saturación en el hierro y permitiendo un incremento



en el par de arranque. Conforme la velocidad del rotor aumenta el valor de las resistencias se reduce hasta llegar a cero, lo que permite mantener un par alto.

2.4 Motor de inducción con rotor de jaula de ardilla:

Al igual que en el motor de rotor bobinado se encuentra un estator, un rotor, un eje mecánico y una caja de terminales. Ver figura N° 6

A diferencia del motor de rotor bobinado, en el rotor las barras conductoras no están aisladas del núcleo, éstas se construyen ligeramente inclinadas con relación al eje, para *minimizar* el efecto de ruido y las variaciones de campo magnético, Las ranuras se colocan de manera oblicua formando un ángulo de cerca de un paso de ranura. La oblicuidad reduce las variaciones del par y previene al rotor de encerrarse con una armónica durante el arranque y por lo tanto girar a una mucho más reducida velocidad. Las desventajas de la oblicuidad son: un voltaje inducido en el rotor reducido, una resistencia del rotor incrementada y un flujo dispersión del rotor incrementado, pero estas desventajas se vienen abajo con el mejor funcionamiento en el arranque y una operación más silenciosa. Ver figura N° 5

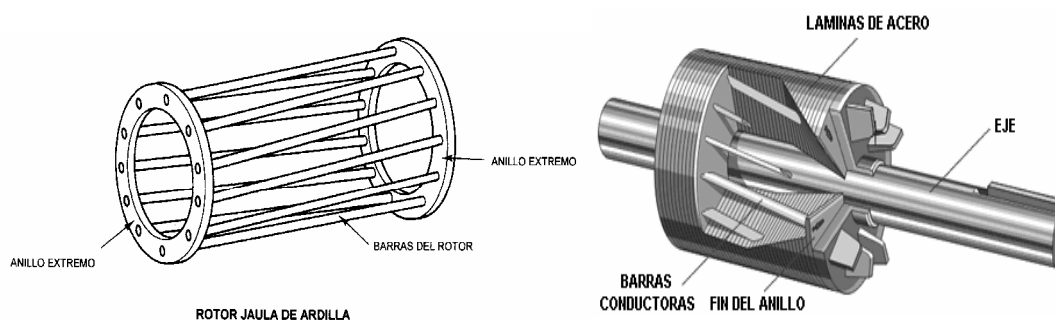
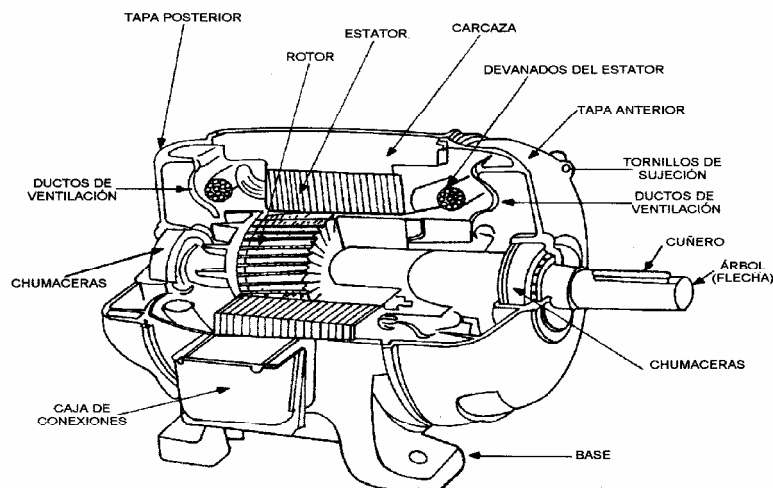
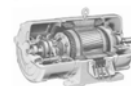


Figura N° 5. Rotor jaula de ardilla

En los extremos del rotor se ven unos anillos para cortocircuitar las barras. No se tiene acceso a la conexión del rotor, este se cortocircuita internamente. En el motor de jaula de ardilla, mostrado en la figura 6, los devanados del rotor en realidad son barras macizas de aluminio que están fundidas en las ranuras del rotor, y que están en cortocircuito entre sí mediante anillos de aluminio vaciados en cada extremo del rotor. Este tipo de construcción de rotor tiene como resultado motores de inducción relativamente baratos y muy confiables, factores que contribuyen a su inmensa popularidad y muy difundida aplicación.



ASPECTO CONSTRUCTIVO Y PARTES CONSTITUTIVAS
DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN TIPO JAULA DE ARDILLA

Figura N° 6 Corte esquemático de un motor de inducción con rotor jaula de ardilla

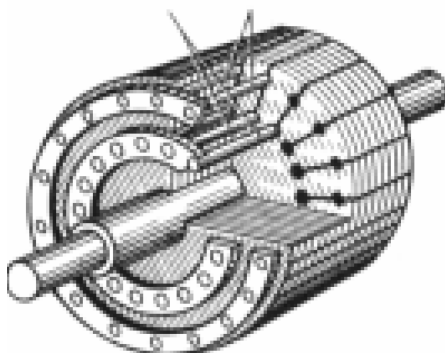
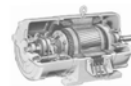
Cuando el motor se conecta a una fuente de suministro trifásica, el estator induce unas corrientes en las barras del rotor. La interacción del campo magnético generado entre el rotor y el estator origina el par y por tanto la rotación del rotor.

Al final del eje del rotor se fija un ventilador, encargado de refrigerar el interior del motor cuando este está girando.

2.5 Motor de rotor de doble jaula:

En este tipo de motor, el rotor tiene dos secciones, la exterior está diseñada con un material de resistencia más elevada que la interior. Cuando el motor está funcionando a baja velocidad (mientras arranca), la frecuencia de deslizamiento es alta y la corriente del rotor tiende a circular por la cara exterior (debido al efecto piel), con lo que la resistencia efectiva es mayor y en consecuencia aumenta el par de arranque. Cuando la velocidad del rotor aumenta, la frecuencia de deslizamiento decrece, y la corriente del rotor circula por la zona de baja resistencia del rotor, de forma que las pérdidas energéticas son menores. Ver figura N° 7

El rotor de "doble cubierta" o doble jaula de ardilla, se diseñó para crear un motor de inducción con mejores características de arranque en línea. Dependiendo de la potencia, se emplean diversas variaciones de construcción del rotor.



Por lo tanto, en el arranque, cuando la frecuencia del rotor es alta y es la misma que la de la línea. La impedancia del devanado inferior es mucho mayor que la del devanado superior. En consecuencia, la mayor parte de la corriente en el rotor se induce en el devanado superior, que está diseñado para que su alta resistencia sea igual a su reactancia en el arranque, desarrollando así un par de arranque máximo. Sin embargo, cuando el motor acelera, disminuyen la frecuencia del rotor y la impedancia del devanado inferior o interior, originando a su vez que se induzca más y más corriente en el devanado interior. Por lo tanto, a valores pequeños del deslizamiento, cuando el motor está en su rango normal de plena carga, la mayor parte de la corriente pasa en el devanado interior de baja resistencia dando una alta eficiencia: baja pérdida en el cobre del rotor y buena regulación de velocidad (deslizamiento proporcional a la resistencia).

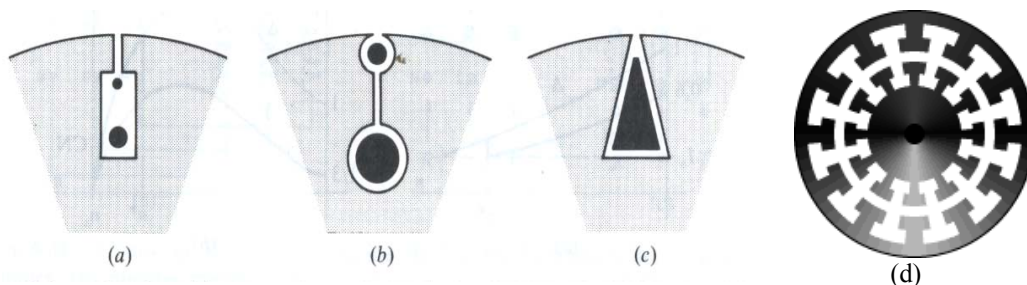
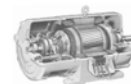


Figura N° 7 a) Doble jaula con ranura única b) con doble jaula en doble ranura, c) Con sección variable del conductor, d) Chapa de Fe – Si Rotor de doble jaula de ardilla

En los motores pequeños, las laminaciones se diseñan de tal modo que, en virtud de la forma y el área de su sección transversal, se pueda emplear una aleación normal para fundir. Las barras inferiores tienen mayor área y baja resistencia con alta reactancia, y las barras superiores, de menor área, tienen alta resistencia y baja reactancia.



2.6 Clasificación NEMA de los motores de inducción

La mayoría de los motores de inducción industriales se clasifican según el sistema proporcionado por la Asociación Nacional del Fabricante de Material Eléctrico (NEMA). Los motores trifásicos de potencias mayores de 1 HP son clasificados por las normas NEMA, según el diseño de la jaula del rotor de la siguiente manera: Clase A, Clase B, Clase C y Clase D. A continuación se muestra como son las laminaciones de los motores jaula de ardilla según la NEMA

Para distinguir entre diversos tipos disponibles, la National Electrical Manufacturers Association (NEMA) ha desarrollado un sistema de identificación con letras en la cual cada tipo de motor comercial de inducción de jaula de ardilla se fabrica de acuerdo con determinada norma de diseño y se coloca en determinada clase, identificada con una letra.

Las propiedades de la construcción eléctrica y mecánica el rotor, en las cuatro clases NEMA de motores de inducción de jaula de ardilla, mas una clase F se resume en la tabla N° 1

Cuando se desarrolló por primera vez el rotor de doble jaula de ardilla se creó tal variedad y adaptabilidad en el diseño de rotores para motores de inducción que ha llevado a diversas características de curva deslizamiento - par. Al dar la proporción correcta al devanado de doble jaula de ardilla, los fabricantes han desarrollado numerosas variaciones del diseño del rotor vaciado o normal único. Estas variaciones tienen por consecuencia pares de arranque mayores o menores que el diseño normal y también menores corrientes de arranque.

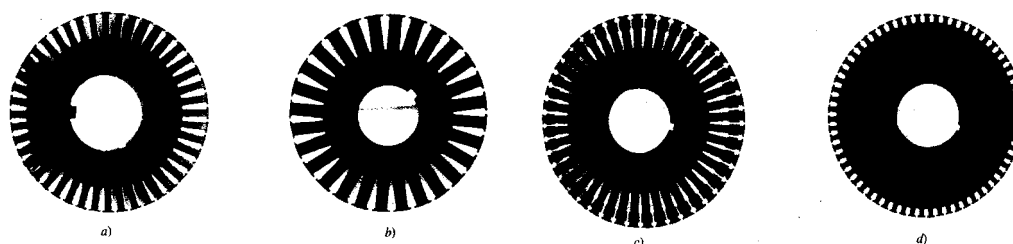
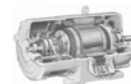


Figura N° 8 Laminaciones de los rotores según la clasificación NEMA

- (a) NEMA Clase A: barras grandes cerca de la superficie.
- (b) NEMA Clase B: barras del rotor grandes y profundas.
- (c) NEMA Clase C: el plano de un rotor de jaula doble.
- (d) NEMA Clase D: barras pequeñas cerca de la superficie.



Anexo 2 Máquinas Asíncronas



Clase NEMA	Par de arranque (# de veces el nominal)	Corriente Arranque	Regulación de Velocidad (%)	Nombre de clase del motor
A	1.5-1.75	5-7	2-4	Normal
B	1.4-1.6	4.5-5	3.5	De propósito general
C	2-2.5	3.5-5	4-5	De doble jaula, alto par
D	2.5-3.0	3-8	5-8,8-13	De alto par, alta resistencia
F	1.25	2-4	mayor de 5	De doble jaula, bajo par y baja corriente de arranque.

Tabla 1 Características de los motores comerciales de inducción jaula de ardilla de acuerdo con la clasificación NEMA. (A,B,C,D)

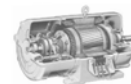
2.6.1 Motores de inducción de jaula de ardilla clase A

El motor clase A es un motor de jaula de ardilla normal o estándar fabricado para uso a velocidad constante. Tiene grandes áreas de ranuras para una muy buena disipación de calor, y barras con ranuras ondas en el motor. Durante el periodo de arranque, la densidad de corriente es alta cerca de la superficie del rotor; durante el periodo de la marcha, la densidad se distribuye con uniformidad. Esta diferencia origina algo de alta resistencia y baja reactancia de arranque, con lo cuál se tiene un par de arranque entre 1.5 y 1.75 veces el nominal (a plena carga). El par de arranque es relativamente alto y la baja resistencia del rotor produce una aceleración bastante rápida hacia la velocidad nominal. Tiene la mejor regulación de velocidad pero su corriente de arranque varía entre 5 y 7 veces la corriente nominal normal, haciéndolo menos deseable para arranque con línea, en especial en los tamaños grandes.

2.6.2 Motores de inducción de jaula de ardilla clase B

A los motores de clase B a veces se les llama motores de propósito general; es muy parecido al de la clase A debido al comportamiento de su deslizamiento-par. Las ranuras de su motor están embebidas algo más profundamente que en los motores de clase A y esta mayor profundidad tiende a aumentar la reactancia de arranque y la marcha del rotor. Este aumento reduce un poco el par y la corriente de arranque.

Las corrientes de arranque varían entre 4 y 5 veces la corriente nominal en los tamaños mayores de 5 HP se sigue usando arranque a voltaje



reducido. los motores de clase B se prefieren sobre los de la clase A para tamaños mayores.

Las aplicaciones típicas comprenden las bombas centrífugas de impulsión, las máquinas herramientas y los sopladores.

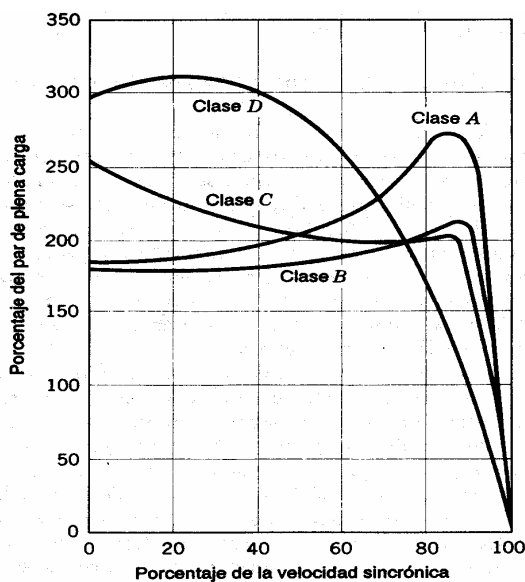


Figura N° 8 Característica Par -Velocidad para los motores según NEMA

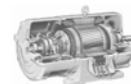
2.6.3 Motores de inducción de jaula de ardilla clase C

La Clase C son motores que tienen un rotor de doble jaula de ardilla, el cual desarrolla un alto par de arranque y una menor corriente de arranque, por ello son utilizados para cargas de arranque pesado

Debido a su alto par de arranque, acelera rápidamente, sin embargo cuando se emplea en grandes cargas, se limita la disipación térmica del motor por que la mayor parte de la corriente se concentra en el devanado superior.

En condiciones de arranque frecuente, el rotor tiene tendencia a sobre calentarse, se adecua mejor a grandes cargas repentinas pero de tipo de baja inercia.

Además de tener un deslizamiento nominal normal y corriente de arranque normal. Estos motores tienen un deslizamiento nominal menor que el 5%. Los motores de la Clase C son convenientes para conducir los compresores, transportadores, trituradoras, etc. Las características de Torsión Vs. Velocidad para las diversas clases de motores de inducción se muestran en la figura N° 8.



2.6.4 Motores de inducción de jaula de ardilla clase D

Los motores comerciales de inducción de jaula de ardilla clase D se conocen también como de alto par y alta resistencia. Las barras del rotor se fabrican en aleación de alta resistencia y se colocan en ranuras cercanas a la superficie o están embebidas en ranuras de pequeño diámetro. La relación de resistencia a reactancia del rotor en el arranque es mayor que en los motores de las clases anteriores.

El motor está diseñado para servicio pesado de arranque, encuentra su mayor aplicación con cargas como cizallas o troqueles, que necesitan el alto par con aplicación a carga repentina la regulación de velocidad en esta clase de motores es la peor.

2.6.5 Motores de inducción de jaula de ardilla de clase F

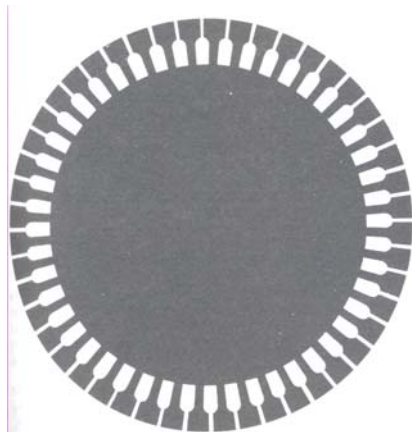


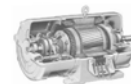
Fig. N° 9 Chapa de una jaula de ardilla clase F

El rotor de clase F se diseñó para reemplazar al motor de clase B. El motor de clase F produce pares de arranque aproximadamente 1.25 veces el par nominal y bajas corrientes de arranque de 2 a 4 veces la nominal. Los motores de esta clase se fabrican de la capacidad de 25 hp para servicio directo de la línea. Debido a la resistencia del rotor relativamente alta de arranque y de marcha, estos motores tienen menos regulación de voltaje de los de clase B, baja capacidad de sobrecarga y en

general de baja eficiencia de funcionamiento. Sin embargo, cuando se arrancan con grandes cargas, las bajas corrientes de arranque eliminan la necesidad de equipo para voltaje reducido, aún en los tamaños grandes. La figura muestra un corte transversal de un diseño clase F, las barras del rotor están profundamente enterradas, tienen muy alta reactancia de dispersión.

2.6.6 Motor síncrono de inducción (polifásico de reluctancia)

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 el 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, por el 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 de 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 deslizamiento mayor, menor eficiencia y menor posibilidades entrada en sincronismo con carga mediante el par de reluctancia.

Como motor síncrono, trabaja a velocidad constante hasta un poco más del 200% de la plena carga. Si la carga aplicada es mayor que el 200% del par a plena carga se baja a su característica de inducción, en donde puede seguir trabajando como motor de inducción hasta casi el 700% del par a plena carga.

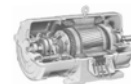
Debido a que el par crítico del motor síncrono es aproximadamente la tercera parte del correspondiente del de inducción, el armazón del estator de un motor síncrono de inducción es de tamaño tres veces mayor que un motor ordinario de inducción de la misma potencia. Además, puesto que trabaja desde sin carga hasta plena carga como motor síncrono sin excitación un mayor ángulo de par compensa la falta de excitación y el motor toma una alta corriente de retraso a bajo factor de potencia. Esto también ocasiona baja eficiencia y necesita de mayor tamaño de armazón para disipar el calor.

En motores de potencia relativamente baja, como el motor síncrono de inducción, los problemas creados por su mayor tamaño y peso, baja eficiencia y corriente en retraso no tienen importancia en comparación con las ventajas de velocidad constante, robustez, falta de excitación de CD, alto par de arranque, de marcha y de mantenimiento mínimo que caracterizan a estos motores.

3 . EL MOTOR DE INDUCCIÓN. FUNCIONAMIENTO

3.1 Generalidades

Una máquina de inducción por lo regular trabaja como motor y se puede considerar que es un transformador generalizado. Ya que se presenta el fenómeno de inducción a través del cual se inducen corrientes en los



circuitos del rotor, pero la diferencia con respecto al transformador estático es que en el motor de inducción se tiene movimiento mecánico, esto origina que las corrientes inducidas tengan frecuencias diferentes a las corrientes del estator.

Al motor de inducción se le suministra corriente eléctrica alterna a los devanados del estator y mediante el fenómeno de inducción se inducen corrientes en las espiras del rotor teniendo así la interacción de dos campos magnéticos, esto es, el del rotor y el estator, lo cual origina un par electromagnético aprovechándose dicho par en la flecha para impulsar una carga mecánica acoplada al eje del rotor.

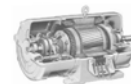
El flujo del estator del motor de inducción adelanta al del rotor y produce un par electromagnético. Es esencial reconocer que los flujos del estator giran en sincronismo entre sí, y que este par se relaciona con el deslizamiento relativo entre ellos. Sin embargo, a diferencia de una máquina síncrona, el rotor no gira en forma síncrona; es el deslizamiento del rotor a través del flujo síncrono de la armadura lo que da lugar a las corrientes inducidas en el rotor, y por lo tanto al par. Un motor de inducción trabaja a una velocidad poco menor que la velocidad síncrona.

Aunque el motor de inducción es el más común de todos, raramente se usa como generador; sus características de funcionamiento como generador son insatisfactorias en la mayoría de las aplicaciones. La máquina de inducción se puede emplear también como un cambiador de frecuencia.

3.2 La máquina asíncrona funcionando como motor

Suponiendo que el motor es arrancado con la tensión nominal aplicada a los terminales del estator (arranque a plena tensión), desarrollará un par de arranque que determinará un aumento de velocidad. Cuando la velocidad aumenta desde reposo (deslizamiento del 100%), su deslizamiento disminuirá y su par aumentará hasta aquel valor de deslizamiento en el que se desarrolla el par máximo. Esto determina que la velocidad aumente aún más, reduciendo el deslizamiento y el par desarrollado por el motor de inducción simultáneamente. Tanto el par desarrollado en el arranque como el correspondiente al valor de deslizamiento que produce el par máximo, son superiores (ordinariamente) al par aplicado de la carga. La velocidad del motor aumentará, por consiguiente, hasta que el valor de deslizamiento sea tan pequeño que el par desarrollado se reduzca a un valor igual al par aplicado. El motor continuará funcionando a esta velocidad y valor de equilibrio del deslizamiento hasta que el par aplicado disminuya o aumente.

Cuando se libera el rotor bloqueado, con el arrollamiento cerrado, éste comienza a girar debido a que el flujo giratorio ejerce fuerzas



tangenciales sobre los conductores que conducen corriente. La dirección de rotación del rotor es la misma que la del flujo giratorio que gira a una velocidad constante relativa al estator, esto es, a la velocidad síncrona η_s , donde f_i es la frecuencia de la red de alimentación y p es el número de polos con que se ha fabricado la máquina.

$$\eta_s = 120 \cdot f_i / p$$

Cuando el rotor está en reposo, la velocidad relativa entre el flujo giratorio (C.M.G) y el rotor es igual a la velocidad síncrona η_s y la fem inducida en el rotor es $E_2' = E_1$. Cuando el rotor gira a una velocidad η_2 , la velocidad relativa entre el flujo giratorio y el rotor es:

$$\eta_s - \eta_2$$

Ya que es la velocidad relativa entre el flujo y el rotor, lo que determina la magnitud y la frecuencia de la fem inducida en el rotor, la magnitud de la fem inducida en el arrollamiento del rotor a la velocidad η_2 es

$$E_2' \cdot s = \{(\eta_s - \eta_2) / \eta_s\} \cdot E_2'$$

y la frecuencia de esta fem es

$$f_2 = [(\eta_s - \eta_2) / \eta_s] \cdot f_i$$

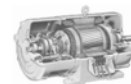
3.3 El deslizamiento s .

La cantidad $(\eta_s - \eta_2) / \eta_s$ es conocida como el *deslizamiento*, esto es,

$$s = [(\eta_s - \eta_2) / \eta_s]$$

En otras palabras se llama deslizamiento a la pérdida de velocidad angular del motor (necesaria para que sea producido un par electromagnético), expresada por unidad de velocidad síncrona. El deslizamiento da la velocidad relativa entre el flujo giratorio y el rotor como una fracción de la velocidad síncrona

En reposo, $\eta_2 = 0$ y $s = 1$; a la velocidad síncrona la velocidad relativa entre el flujo giratorio y el rotor es igual a cero y no se induce fem en el rotor. Por lo tanto, no hay corriente en el rotor y no se ejerce fuerza tangencial en el rotor a la velocidad síncrona. Un motor de inducción no está capacitado para alcanzar la velocidad síncrona; girará con un deslizamiento



suficiente que bastará para inducir la corriente necesaria para producir la fuerza tangencial y el par motor requerido por la carga. El deslizamiento es la base variable del motor de inducción.

Se puede observar que, si el rotor girase a velocidad síncrona ($s = 0$); y si el rotor está quieto ($s = 1$), todas las velocidades normales del motor están comprendidas entre estos dos valores.

$$0 < \eta < \eta_s \quad f_2 = s \cdot f_1 \quad 0 < s < 1$$

Donde.

f_2 es la frecuencia en el rotor

f_1 es la frecuencia en el C.M.G. del estator (frecuencia de la red)

Tabla N° 2. Relaciones entre s , η y f en un motor asíncrono

$\eta_2(\text{rpm})$	0	η	η_s
s	1	$0 < s < 1$	0
$f_2(\text{Hz})$	f_2	f_2	0

La característica esencial que distingue a una máquina de inducción de los demás motores eléctricos es que las corrientes secundarias son creadas únicamente por inducción.

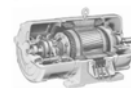
3.4 El motor funcionando en vacío:

El deslizamiento es muy pequeño (inferior al 1 %) y la frecuencia del rotor, la reactancia del rotor y la fem inducida en el rotor son muy pequeñas. Por consiguiente, la corriente en el rotor es pequeña y suficiente únicamente para producir el par en vacío necesario. Ya que la corriente del rotor es pequeña, la corriente del estator (primaria) es el vector suma de su corriente de excitación I_m necesaria para producir el flujo rotatorio en el estator, y una componente primaria de carga I_p , inducida en el motor por el efecto de transformador.

El factor de potencia sin cargar se representa mediante $\cos \phi_0$, el ángulo entre I_0 y E_0 . Así, $I_0 \cdot \cos \phi_0$ es la suma de $I_p + I_r$ es decir, la pequeña corriente del rotor I_r producida por el equivalente al roce o pérdidas mecánicas y por un componente primario I_p de pérdida, debido a la histéresis y corrientes parásitas en el hierro del estator y del rotor. Se nota que si I_m es grande, el factor de potencia es extremadamente pequeño y está en retraso.

3.5 El motor funcionando a media carga:

Cuando al rotor se aplica una carga mecánica, la velocidad disminuye ligeramente. La pequeña disminución de velocidad determina un aumento de



deslizamiento y de frecuencia del rotor, reactancia del rotor y fem inducida en el rotor. El aumento de corriente inducida en el rotor (secundario) se traduce en un aumento de la corriente primaria del estator. Esta componente de la corriente primaria del estator es una componente de potencia activa, como I_p , y está en fase con la tensión inducida en el primario.

3.6 El motor funcionando a plena carga:

El motor girará a un valor de deslizamiento que proporciona un equilibrio entre el par desarrollado y el par aplicado. Al aplicar más carga, por consiguiente, el deslizamiento aumenta debido a que el par aplicado supera al par desarrollado. Cuando al eje del motor de inducción se aplica el par nominal, la componente de la corriente primaria del estator en fase absorbida por el motor de inducción es grande en comparación con la corriente en vacío. El factor de potencia varía entre 0.8 (en motores de inducción pequeños de aproximadamente 1 hp) hasta aproximadamente 0.9 y 0.95 (en los motores de inducción grandes, de 150 hp y superiores).

3.7 El motor funcionando más allá de la plena carga:

Al aumentar la carga y el deslizamiento, la frecuencia del rotor continúa aumentando y el aumento de la reactancia del rotor produce una disminución del factor de potencia del rotor. A fin de producir el necesario aumento del par para equilibrar al par aplicado, las corrientes del rotor y el estator deben aumentar producto de la sobrecarga, a un factor de potencia peor que con la corriente del estator a plena carga.

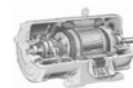
3.8 Analogía con los transformadores

El análisis de los transformadores para el estudio de la condición de su máximo rendimiento es extremadamente útil para la comprensión de una condición semejante para motores. En estos últimos las pérdidas intrínsecas son las que hay en el cobre y en el hierro, siendo las pérdidas por rozamiento y ventilación normalmente de un orden mucho menor. Es obvio que en los transformadores, las pérdidas mecánicas no existen. De esta forma si analizamos el comportamiento de un transformador, estaremos procediendo a un análisis simplificado, pero consistente de las pérdidas intrínsecas en un motor.

En la ecuación válida para transformador $P_{\text{tot}} = P_{\text{Cu}} + P_{\text{Fe}}$ se debe recordar que mientras la primera parte depende de la corriente y, por tanto de la potencia, la segunda depende de la densidad de flujo y, por tanto de la tensión. Al hacer una extensión a un motor conectado a línea, girando en vacío, se puede suponer que este poseerá casi la totalidad de sus pérdidas



Anexo 2 Máquinas Asíncronas



en el hierro, pues la única corriente que circulará en los arrollamientos será la corriente de magnetización; naturalmente las pérdidas de rozamiento y ventilación, en el caso del motor estarán también presentes. El factor de potencia en esta condición será muy bajo. A medida que se aumente la carga solicitada al motor, crecerán las pérdidas en el cobre; sin embargo la tasa de crecimiento de las pérdidas totales será inferior a la tasa de crecimiento de la potencia mecánica transmitida a la carga o sea, habrá un aumento de rendimiento que llegará a un máximo y después decrecerá, a medida que las pérdidas en el cobre se vayan haciendo más elevadas que en el hierro.

Retornando el análisis del transformador, y considerando, para la determinación que, sigue, que el transformador opera a su fracción "x" de su potencia nominal, las pérdidas totales serán:

$$P_{\text{tot}} = P_{\text{Fe}} + x^2 * P_{\text{Cu}}$$

Lo que es consecuencia de las consideraciones hechas con respecto a los parámetros que afectan cada una de las partes componentes de las pérdidas totales. Siendo P_{nom} la potencia nominal, el rendimiento o eficiencia ϵ de una fracción de la carga será:

$$\epsilon_x = [xP / xP + P_{\text{Fe}} + x^2 * P_{\text{Cu}}]$$

si se desea saber cual debe ser la distribución entre las pérdidas en el cobre y en el hierro para que un transformador, funcionando a x % de su potencia nominal, presente el máximo rendimiento, se hace:

$$d\epsilon_x/dx = 0$$

por consiguiente

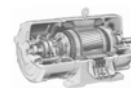
$$P (P_x + P_{\text{Fe}} + x^2 * P_{\text{Cu}}) - P_x * (P + 2 x * P_{\text{Cu}}) = 0$$

De donde:

$$P_{\text{Fe}} = x^2 * P_{\text{Cu}}$$

Se pueden sacar algunas conclusiones relevantes de este resultado y de las consideraciones hechas anteriormente.

La condición de **máximo rendimiento** de un transformador se da cuando las pérdidas en el hierro son iguales a las pérdidas en el cobre; si esto se comprueba en la potencia nominal, el transformador presentará una curva de rendimiento ascendente a medida que la potencia que se le solicita se aproxime a la nominal.



En el caso de motores se ve aproximadamente el mismo comportamiento si las pérdidas mecánicas son pequeñas

Para los motores proyectados con una determinada potencia nominal en el régimen continuo y seleccionado para regímenes intermitentes, o continuos con carga intermitente, de acuerdo con los criterios descritos, se espera un rendimiento y un factor de potencia visto por la red de alimentación, inferior a los nominales del motor así seleccionado. Naturalmente es posible, si se informa al fabricante de los parámetros que caracterizan el accionamiento, proyectar un motor que *atienda* a la condición de máximo rendimiento en régimen intermitente o continuo con carga intermitente.

Al súper dimensionar la potencia de un motor para un determinado accionamiento, se debe tener en cuenta que esto implica el detrimento del rendimiento y del factor de potencia, ya que los motores suelen proyectarse para alcanzar los máximos valores de η y $\cos \phi$ con la carga nominal.

El uso de un transformador como modelo para analizar el comportamiento de un motor es una simplificación que afecta la calidad de los valores obtenidos. La pérdida de precisión se compensa en gran parte por la simplicidad y los conceptos básicos no solo se preservan si no que también se acentúan.

4. CIRCUITO EQUIVALENTE DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN

El circuito equivalente mostrado en la figura N° 16 se encuentra referido al estator y todos sus parámetros son de fase. Además se definen todos los parámetros y variables que intervienen en el mismo-

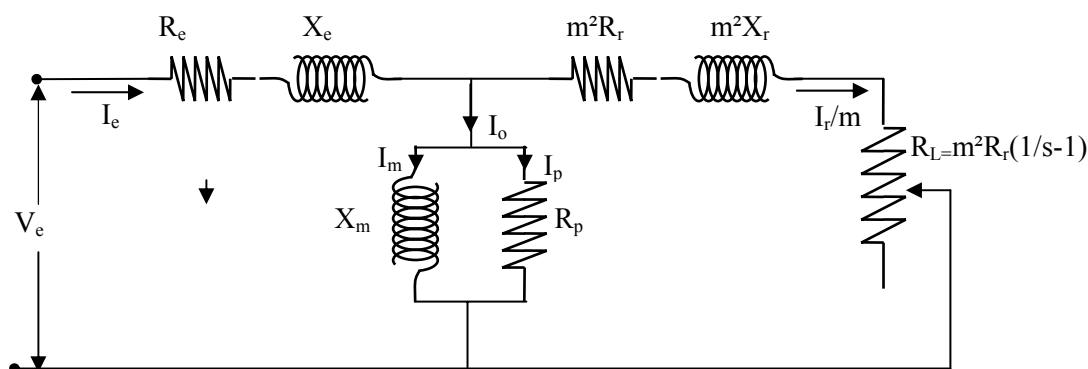
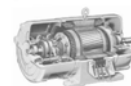


Figura N° 16 Circuito equivalente exacto de un motor de inducción

$R_L = m^2 R_r (1/s - 1)$ = Resistencia equivalente donde se disipa la potencia mecánica desarrollada en el eje.



R_p : resistencia equivalente del núcleo de hierro

X_m : reactancia del núcleo.

R_e : resistencia del estator por fase.

X_e : reactancia del estator,

$m^2 R_r$: resistencia del rotor referida al estator.

$m^2 X_r$: reactancia del rotor referida al estator equivalente al flujo disperso en el rotor.

m : Relación de espiras entre estator y rotor.

V_e : Tensión de fase aplicada al estator.

I_e : Corriente de fase circulante por el estator .

I_r/m : Corriente de fase por el rotor, referida al estator

I_o Corriente absorbida en vacío, por fase $I_o = I_p + I_m$

I_p Corriente equivalente a la necesaria requerida para suplir el calentamiento en el núcleo de hierro.

I_m corriente encargada de la magnetización del circuito del motor.

4.1 Prueba en vacío sin carga o a rotor libre

Para esta prueba el eje se deja girar libremente es decir sin carga; o se impulsa con otro tipo de motor que permite llevar el rotor a la velocidad sincrónica.

Es frecuente que bajo condiciones de vacío, el factor de potencia sea inferior al 50% lo cual se puede observar mediante la desviación a la izquierda de la aguja de uno de los vatímetros, si la conexión es correcta. Para tomar la lectura de dicho vatímetro será necesario invertir los bornes de corriente del aparato, siendo en consecuencia negativa. Es decir:

$$W_o = W_1 \pm W_2$$

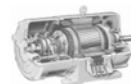
El signo $\pm$ indica que pueden presentarse los dos casos, es decir, que el factor de potencia en vacío sea mayor o menor de 0,5. Para un caso será la suma de la lectura de los vatímetros y para el otro la diferencia de las mismas.

Por otra parte se mide la tensión y la corriente de donde se deduce que:

$$W_o = \sqrt{3} \overline{V}_o \cos \phi_o \text{ (trifásica)} \quad \text{y} \quad \cos \phi_o = W_o / \sqrt{3} \overline{V}_o$$

En consecuencia se obtiene la magnitud de I_o (medido) y su desfase (calculado) respecto a la tensión.

Debe tenerse presente que al medir I_o , dejando que gire libremente el rotor no se desprecian las pérdidas por rozamiento y resistencia del aire. En la práctica es frecuente realizar el ensayo con esta aproximación, pues los resultados finales se obtienen con el suficiente grado de exactitud. Además mediante este ensayo es posible determinar las pérdidas del hierro y



mecánicas, ya que si la potencia de salida es cero toda la potencia de entrada cubrirá pérdidas. Luego:

$$P_{Fe} + P_{roce} = W_o - 3 I_o^2 R_e$$

con R_e = Resistencia por fase del estator

$P_{Fe} + P_{roce}$ = Pérdidas rotatorias, se consideran fijas o constantes

Aquí las pérdidas se cargan al estator. Debido a que el deslizamiento es mínimo: las corrientes del rotor, las pérdidas magnéticas en este y las pérdidas en el cobre del rotor se consideran como insignificantemente pequeñas.

En este ensayo el motor se conecta a su tensión nominal, pero sin ninguna carga mecánica conectada al eje. En estas circunstancias la velocidad del motor es muy próxima a la de sincronismo y el deslizamiento es prácticamente nulo. El valor de la resistencia R_L del circuito equivalente es infinito (o sea, circuito abierto) y el circuito equivalente para este ensayo es el de la figura N° 17.

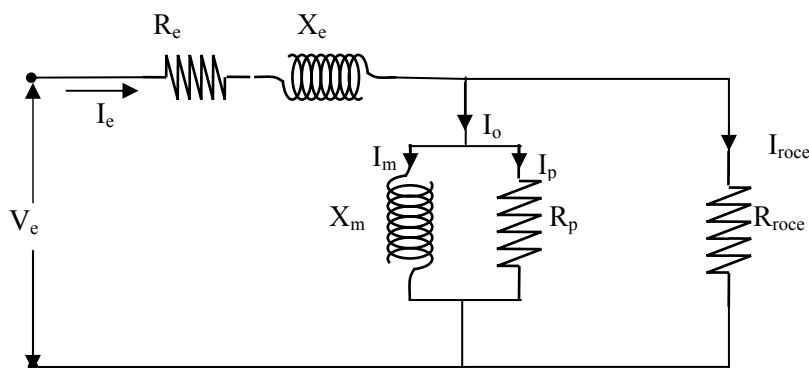


Figura N° 17 Circuito equivalente exacto en vacío de un motor de inducción

Para obtener de la manera más exacta posible los parámetros del circuito equivalente (rama en paralelo: R_p , X_m) se requiere separar de las pérdidas rotatorias las correspondientes al núcleo P_{Fe} , de las mecánicas, roce o resistencia del aire $P_{R_{roce}}$

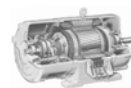
Luego la potencia absorbida por el circuito toda se transformaría en pérdidas y es

$$W_o = (P_{Fe} + P_{roce}) + 3 I_o^2 R_e$$

Donde $3 I_o^2 R_e$ son las pérdidas del cobre del estator en condiciones de vacío y se pueden calcular usando la resistencia medida del devanado estátorico por fase. Estas pérdidas resultan pequeñas en comparación con las restantes obtenidas del ensayo debido a que la corriente en vacío de los motores de inducción tiende a no superar el 10% de I_n (Esto es valido en



Anexo 2 Máquinas Asíncronas



motores grandes). En motores pequeños puede llegar a ser mayor, ya que en ellos el rendimiento no es muy importante.

Del circuito de la figura 17 se desprende la circulación de una corriente por el rotor I_{roce} esta corriente es la mínima necesaria para vencer las pérdidas por rozamiento y resistencia del aire, luego :

$$P_{roce} = 3(I_{roce})^2 R_{roce}$$

lo cual no resulta fácil de hallar, requiriéndose de otro ensayo (ensayo a velocidad de sincronismo) para poder separar las pérdidas del hierro, de las mecánicas o de roce. Sin embargo y de manera gráfica, usando el ensayo en vacío, podemos obtener la separación de estas pérdidas para cualquier tensión.

Para el ensayo en vacío, se debe variar la tensión aplicada desde aproximadamente un 20% de la tensión nominal hasta un valor ligeramente superior al nominal y graficar W_o vs V_o^2 de donde obtendremos una línea recta que permitirá obtener las Pérdidas de roce a partir del corte con el eje y.

$$y = mx + b \quad W_o = P_{Fe} + P_{roce} + 3I_o^2 R_e$$

Si consideramos que la caída de tensión en la resistencia R_e es muy pequeña pudiendo usar el circuito equivalente aproximado indicado en la figura N° 18.

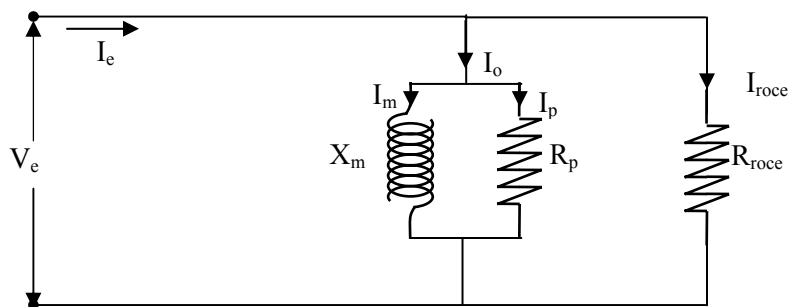


Figura N° 18 Circuito equivalente aproximado en vacío de un motor de inducción considerando el roce o resistencia del aire

Entonces : $W_o = P_{Fe} + P_{roce}$ $P_{Fe} = 3 \cdot I_p^2 R_p = 3 \cdot (V_o^2 / R_p)$

$$W_o = 3(V_o^2 / R_p) + P_{roce} \quad y = mx + b \quad \text{donde:}$$

$$y = W_o ; \quad x = V_o^2 ; \quad m = 3/R_p \quad b = P_{roce}$$

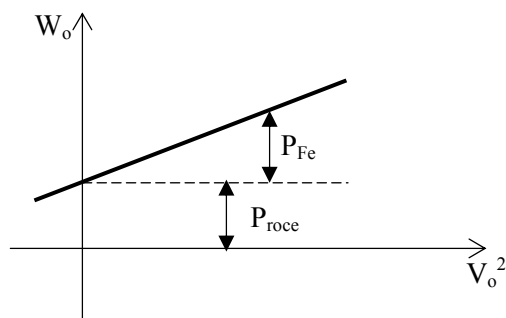
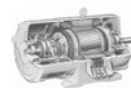


Figura N° 19 gráfica de W_o Vs V_o^2 para separar las pérdidas del hierro de las mecánicas

Una vez separada las pérdidas de roce de las pérdidas del hierro podemos calcular R_p para $V_o = V_n$

$$R_p = (3 \cdot V_o^2) / P_{Fe}$$

Otra forma es a partir de la pendiente de la recta m

$$m = 3 / R_p \quad \text{y} \quad R_p = 3 / m$$

También se obtiene

$$X_m = V / I_m$$

$$I_m = I_o \cdot \sin \phi_o \quad \cos \phi_o = W_o / \sqrt{3} V_o I_o \quad I_o = I_p + I_m$$

Si el roce resulta despreciable el nuevo circuito equivalente en vacío resulta

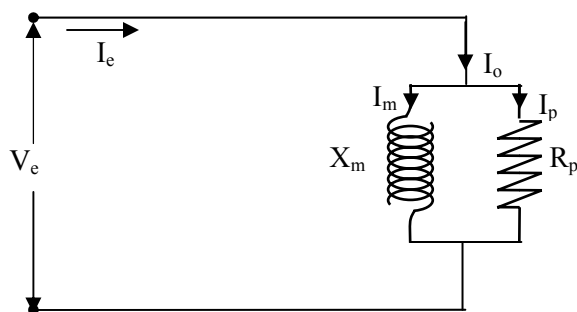
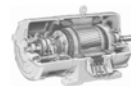


Figura N° 20 Circuito equivalente aproximado en vacío de un motor de inducción

De donde se puede de manera directa calcular:



$$R_p = V_o / I_o \cos \phi_o \quad \text{y} \quad X_m = V_o / I_o \sin \phi_o \quad \text{todos valores de fase}$$

La otra forma de obtener separadamente las pérdidas del hierro de las mecánicas consiste en realizar un ensayo a velocidad de sincronismo. Par realizar este ensayo se precisa una fuente mecánica que arrastre el motor a velocidad sincrónica, en estas condiciones el deslizamiento es nulo y así la corriente del rotor será cero. El circuito equivalente será el de la figura 20. y con propiedad podemos decir que la potencia absorbida por el motor de inducción no contiene la componente de roce, ya que este, está siendo suministrado por la maquina auxiliar o de arrastre. Luego la potencia registrada corresponde a las pérdidas en el núcleo.

4.2 Prueba a rotor bloqueado

Esta prueba se efectúa con el rotor del motor asegurado mecánicamente contra rotación. En estas condiciones, se aplica al motor una tensión alterna, reducida, aproximadamente hasta un 25% de la tensión nominal o hasta que circule una corriente del orden de la nominal, por el estator.

Permite conocer las pérdidas del cobre y con ellas la impedancia equivalente del rotor y del estator.

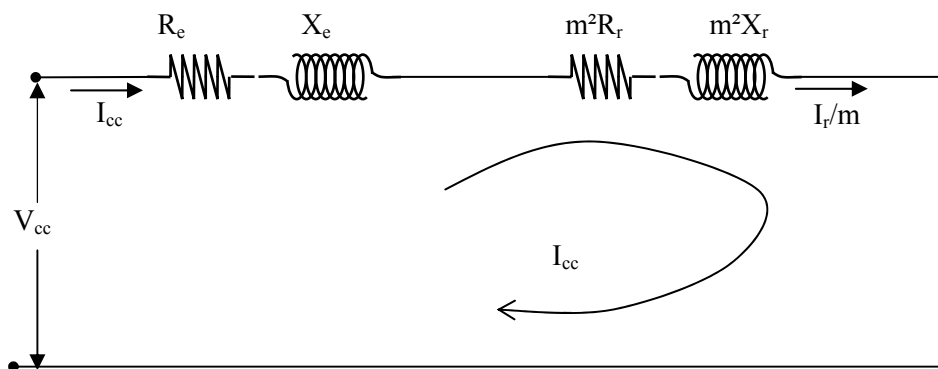
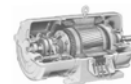


Figura N° 16 Circuito equivalente a rotor bloqueado de un motor de inducción

Además, al ser la tensión aplicada menor que la nominal, la intensidad de magnetización es también mucho menor que en condiciones nominales, luego se puede suprimir la rama en paralelo en estas circunstancias. El circuito de la figura 20 es el monofásico equivalente. La potencia consumida corresponde a una fase. Esta potencia equivale aproximadamente, a las pérdidas, en el cobre en condiciones nominales. Esto será tan cierto cuando



la I_{cc} esté más próxima a la nominal. El siguiente desarrollo permite deducir de las mediciones realizadas los parámetros del circuito equivalente por fase (rama en serie), así como obtener las pérdidas totales del cobre del motor.

$$W_{cc} = P_{cu}^e + P_{cu}^r \quad \cos \varphi_{cc} = W_{cc} / (V_{cc} * I_{cc} * \sqrt{3})$$

$$Z_{eq} = V_{cc} / I_{cc}; \quad X_{eq} = V_{cc} / I_{cc} * \sin \varphi_o \quad R_{eq} = V_{cc} / I_{cc} * \cos \varphi_o$$

$$Z_{eq} = R_{eq} + jX_{eq}; \quad R_{eq} = R_e + m^2 R_r; \quad X_{eq} = X_e + m^2 X_r$$

$$P_{cu}^e = 3I_{cc}^2 * R_e; \quad P_{cu}^r = W_{cc} - P_{cu}^e = I_{cc}^2 * m^2 R_r$$

5. ARRANQUE DE LOS MOTORES DE INDUCCION

5.1 Arranque directo

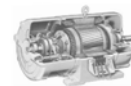
Cuando se conecta un motor de inducción con rotor jaula de ardilla a un sistema de distribución que alimenta también cargas de lámparas incandescentes, es indeseable la elevada corriente de arranque del motor ya que ésta puede producir una caída de tensión indeseable y de aquí una variación en la intensidad luminosa. Cuando la caída de tensión es grande, pueden "salirse" otros motores. En muchos casos, tales como ventiladores y bombas centrífugas, donde el par motor de arranque es pequeño, puede reducirse la corriente de arranque del motor con lo cual decrece el par motor de arranque.

El par motor del motor de inducción varía con el cuadrado de su tensión final. Una reducción de la tensión final del motor hará reducir la corriente de arranque.

En el arranque directo de un motor de inducción, podemos destacar fundamentalmente tres efectos:

El primer efecto es el exceso de par aplicado. Incluso si el par resistente inicial de la carga es bajo, durante el arranque directo se producen una serie de oscilaciones bruscas del par (que alcanzan valores muy elevados) a medida que la velocidad aumenta. Este exceso de par está representado por el área comprendida entre la curva del par de carga y la correspondiente al par del motor, ver figura N°. 9 Cuando comienza el arranque directo, este exceso de par puede ocasionar shocks mecánicos, deslizamiento en las correas y stress en las transmisiones. También puede producir golpes de ariete en las canalizaciones conectadas a bombas. El arranque directo es, básicamente, un arranque incontrolado.

El segundo efecto es la enorme sobrecorriente que circula por el motor. La corriente de arranque típica, en el momento del arranque, es de unas seis veces la corriente nominal. Ello es debido a que, en el arranque, el



deslizamiento es máximo y el motor se comporta como un transformador con el secundario en cortocircuito. Esta sobrecorriente puede ocasionar caídas bruscas de la tensión en líneas de poca capacidad, y obliga a dimensionar los contactores y fusibles adecuados para evitar daños. Las compañías de electricidad normalmente piden que se tomen medidas para reducir las sobrecorrientes de arranque.

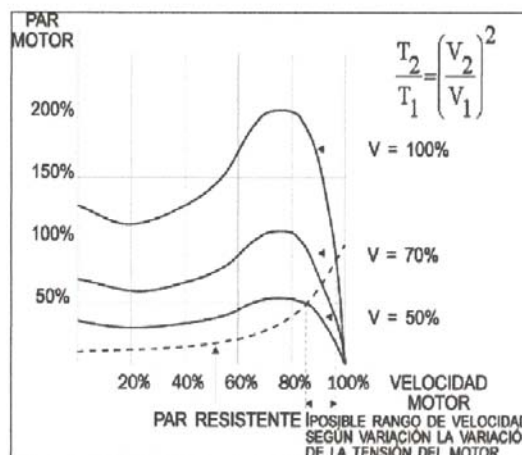
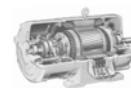


Figura N° 10 Característica Par-Velocidad a distintos valores de tensión en un motor Ind.

El **tercer efecto** es el calentamiento adicional del motor. El calentamiento del rotor es mayor durante el arranque dado que su resistencia efectiva se incrementa en relación al funcionamiento normal. Ello es debido a que el denominado "efecto piel" concentra la corriente en la superficie de las barras del rotor (en el instante inicial del arranque, la frecuencia de las corrientes rotóricas es 60 Hz, comparados con los 2 ó 3 Hz correspondientes al funcionamiento normal). El sobrecalentamiento del rotor puede ser importante tras varios arranques consecutivos, o con cargas de elevada inercia, y puede llegar a fundir las barras o los bobinados del rotor . Se puede demostrar que si la tensión de alimentación de un motor de inducción es reducida durante el arranque, el par disponible disminuye con el cuadrado de la tensión. Si la tensión aplicada al motor se reduce al 71 %, el par disponible se queda reducido al 50% (0.71×0.71) del valor total. La corriente de arranque también se reduce, pero no tanto como el par. Cualquier técnica de arranque basada en la reducción de la tensión de alimentación ocasionará que el motor funcione con un elevado deslizamiento durante periodos de tiempo prolongados. Cuando el deslizamiento es elevado, el par es moderado, el factor de potencia empeora y el calentamiento del motor (especialmente del rotor) se incrementa.



Todos los métodos de arranque que vamos a analizar a continuación reducen la tensión de alimentación pero no modifican la frecuencia. Como consecuencia, el cociente entre el par y la corriente es reducido.

5.2 Arranque a tensión reducida por auto transformador

Un arranque por autotransformador se realiza mediante un autotransformador con varias salidas. Al principio, el motor se conecta a la salida de menor tensión, conmutando a continuación a salidas de voltaje superior a medida que la velocidad se incrementa hasta llegar a la tensión nominal. Normalmente se realizan dos o tres etapas. Cada etapa requiere un contactor, que necesita ser controlado mediante un relé retardado en el caso de un arranque automático. Este método desconecta momentáneamente el motor en cada salto, lo que provoca picos de corriente y pérdidas transitorias de par. Una ventaja de este método es el reducido valor de la corriente debido al efecto transformador.

El autotransformador actúa de dos formas para reducir la corriente absorbida de la red:

- 1.- Reduce la corriente de arranque del motor reduciendo la tensión mediante la relación de transformador por lo que la corriente de línea del primario es menor que la corriente del motor del secundario.
- 2.- Ya que la relación de espiras representa asimismo la relación de tensiones, en consecuencia se reduce la corriente de arranque de la línea según el cuadrado de la relación de espiras.

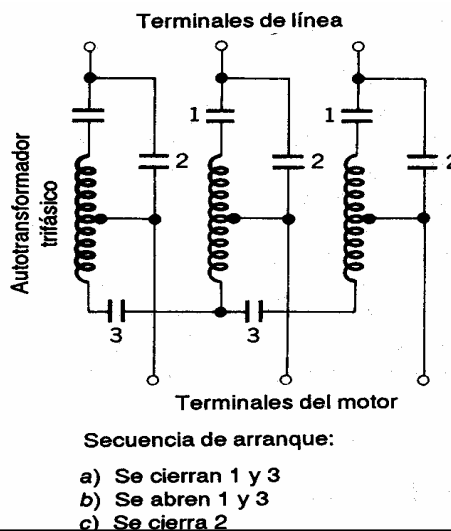
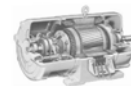


Figura II Arranque de un motor jaula de ardilla con un autotransformador



5.3 Arranque a tensión reducida agregando resistencia o reactancias en serie al estator.

Si en serie con cada una de las conexiones del estator se intercala una resistencia o una reactancia (fig N° 12), la elevada corriente de arranque produce una inmediata reducción de la tensión en los terminales del estator. El par motor disminuye proporcionalmente al cuadrado de la tensión aplicada a los terminales del estator, pero la corriente de línea disminuye solamente en proporción a la disminución de la tensión.

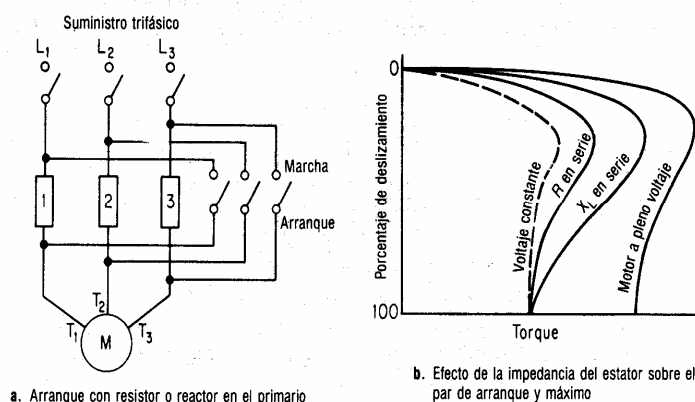


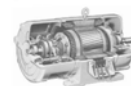
Figura 12 Circuito de arranque con resistor o reactor en el primario y efectos en el estator

Este método de arranque mejorará el factor de potencia en el arranque, pero se producen pérdidas algo mayores y el par máximo no será tan grande para la misma impedancia en serie que el obtenido utilizando una reactancia equivalente.

Este método intercala resistencias en serie con la alimentación durante el arranque. A medida que el motor aumenta la velocidad, se disminuye el valor de las resistencias y finalmente se cortocircuitan. Un arrancador de este tipo de uso muy extendido utiliza resistencias líquidas, constituidas por láminas conductoras introducidas en recipientes de carbonato sódico como elementos resistivos. Este método no proporciona muy buenos resultados en lo que se refiere al control de la tensión en los terminales del motor, y es bastante ineficiente debido a las elevadas pérdidas en las resistencias durante el arranque.

5.4 Arranque estrella-triángulo

En el caso de motores trifásicos, estas pueden conectarse a la red bien en estrella, o en triángulo. Cuando sean admisibles estos bajos pares de arranque, con una corriente de arranque de alrededor del 58% de la corriente normal de arranque, se emplea con frecuencia este método relativamente barato de arranque.



En funcionamiento normal, los devanados están conectados en triángulo, pero en los primeros instantes del arranque se conectan en estrella. Esto reduce la tensión en bornes de los devanados al 57%, y el par de arranque al 33%. Este método tiene la ventaja de mantener constante el cociente entre el par del motor y la corriente.

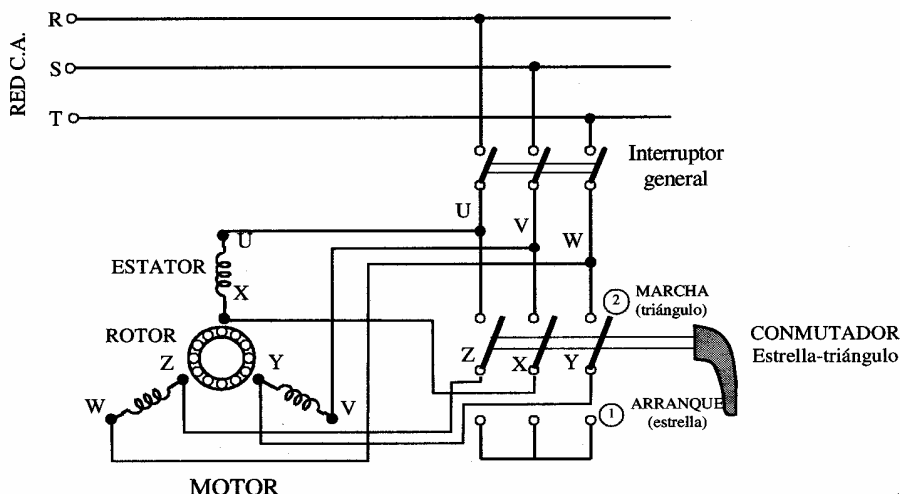


Figura 13 Esquema eléctrico del arranque estrella-delta con conmutador manual

Se sobreentiende que este motor (con seis terminales estatoricos en el caso de un motor de inducción trifásico) es algo mas caro que el motor de inducción clásico, pero su coste es inferior al de los compensadores o el de las impedancias en el primario del estator y los arrancadores asociados

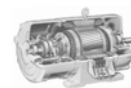
Este método requiere dos contactores, y un relé retardado si el arranque es automático. Durante la transición de estrella a triángulo, el motor está desconectado durante unos instantes, lo que produce una pérdida momentánea del par y un pico de corriente en la reconexión.

5.5 Arranque agregando resistencias al rotor

Los motores de inducción de rotor devanado y anillos rozantes, se arrancan aplicando el voltaje pleno de la línea a *sus* arrollamientos del estator. La corriente de arranque se controla mediante resistencias conectadas por medio de los anillos rozantes a los arrollamientos del rotor.

La conexión es usualmente en estrella, con contactos que permiten ir cortando resistencia en forma tanto manual como automática a medida que el rotor se acelera.

En este caso un aumento de la resistencia en el rotor a la vez que limita la corriente, trae como consecuencia un aumento del par, lógicamente dentro de



ciertos valores, pues si el valor de la resistencia es demasiado alto se disminuye el par.

El par de arranque de estos motores se puede ajustar mediante una resistencia externa al rotor para dar pares de arranque que puedan llegar hasta el par máximo del motor. Como limita la corriente en el circuito del rotor y como da un mayor factor de potencia y par en el instante de arrancar, se reduce considerablemente la corriente de línea del estator.

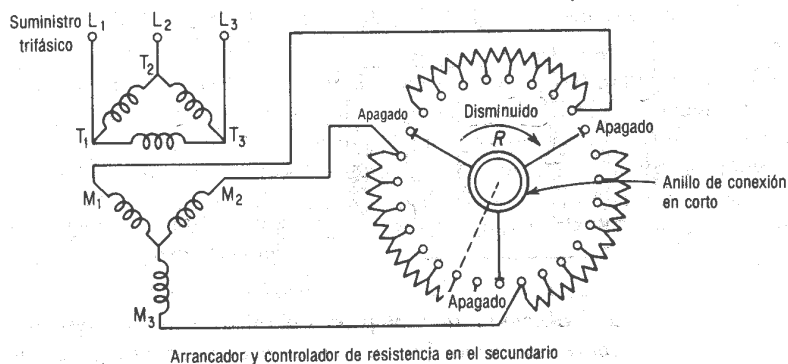


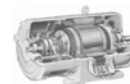
Figura 14 Arranque de un motor de inducción de R.B., agregando resistencias al rotor

5.6 Arrancadores electrónicos

En su forma más extendida, un arrancador electrónico está constituido por tres pares de tiristores en antiparalelo intercalados entre la línea y el motor. Mediante el control del disparo de los tiristores puede ser reducida la tensión aplicada al motor.

Cuando se incrementa la velocidad del motor, la diferencia entre la velocidad del campo en el estator y las barras del rotor es menor, lo que reduce el campo rotórico, y en consecuencia el par disminuye. Cuando se alcanza la velocidad del campo del estator no hay campo inducido en el rotor y el par generado es cero. Estamos en la llamada velocidad de sincronismo del motor.

Cuando aumenta el par de la carga, la velocidad del rotor decrece con lo que aumenta el deslizamiento. Esto provoca que el flujo del estátor corte las barras del rotor a mayor velocidad, con lo que se incrementa la corriente en el rotor y el par. Sin embargo, con el incremento de la corriente del motor se produce una caída de tensión suplementaria en la bobinas del estator, la cual provocará un debilitamiento del campo en el estator. En la Figura 15a se



muestra una curva típica de par / deslizamiento (velocidad) cuando el motor es excitado con una fuente de alimentación trifásica.

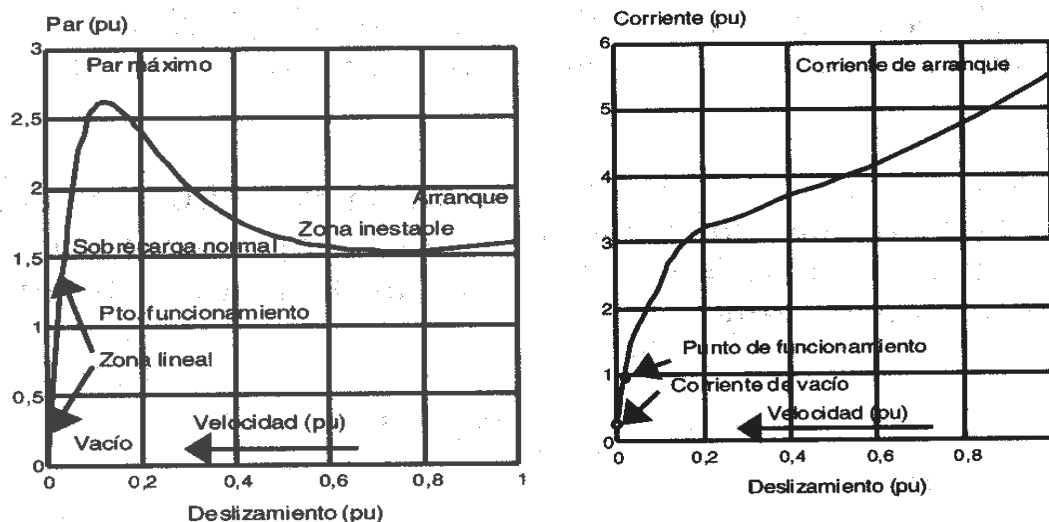


Figura 15 a) Característica Par – Deslizamiento (velocidad) de un motor de inducción.
b) curva típica de corriente y velocidad en un motor de inducción

Con deslizamientos altos, la velocidad del campo magnético que corta el rotor aumenta, así como la corriente que circula por él. Esto se ve reflejado en un aumento en la corriente del estator (Fig 15b). Como en el instante inicial el rotor está inmóvil y alimentado con una frecuencia de suministro de 60Hz, la corriente en el estator puede alcanzar entre 6 y 10 veces la corriente nominal a plena carga.

Incluso cuando el motor está sin carga y girando cerca de la velocidad de sincronismo, absorbe una significativa cantidad de corriente de naturaleza reactiva, destinada a la magnetización de la máquina. Estas componentes de magnetización crean el flujo en el motor. Esta es la razón por la que un motor siempre funciona con un factor de potencia por debajo de la unidad, típicamente 0.86 a plena carga.

Un **variador de frecuencia** es un método más efectivo de arranque para un motor de inducción. Dado que el variador incrementa la frecuencia de acuerdo con una rampa prefijada, el motor puede ser acelerado sin que el deslizamiento sea elevado, de forma que la corriente de arranque puede ser minimizada y obtener un par de arranque controlado. Este sistema presenta la ventaja de poder variar la velocidad de forma continua. El principal inconveniente es el mayor coste inicial del variador.