

# motortico

BOLETÍN TRIMESTRAL PREPARADO POR [WWW.MOTORTICO.COM](http://WWW.MOTORTICO.COM), COSTA RICA



ENERO-MARZO 2020

## Construcción de rotores jaula de ardilla utilizados en motores de inducción

*Al inicio de la historia de las máquinas eléctricas rotativas, los rotores de los motores de inducción se fabricaban con alambre de cobre. El rotor de jaula de ardilla, construido mediante barras de aluminio, fue patentado en 1916 por H. Reist y H. Maxwell, de la compañía General Electric. En este boletín se repasan algunas características y fallas de estos rotores, ampliamente usados hoy en día.*

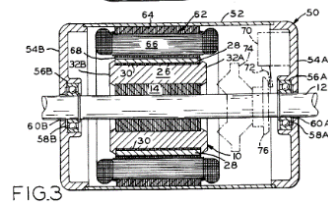
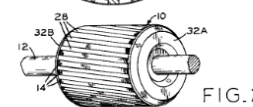
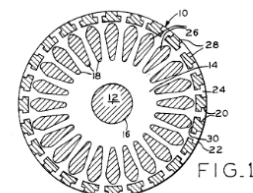
### Introducción

Parte del éxito que ha tenido la *máquina de inducción con rotor jaula de ardilla* es atribuido a la simplicidad y robustez de este tipo de rotor, los cuales se caracterizan por no incluir alambre en sus devanados. El devanado se construye con barras sólidas de aluminio o cobre, de distintas formas, las cuales no están aisladas eléctricamente del núcleo. El núcleo laminado es formado por una serie de láminas de hierro con alta permeabilidad magnética, delgadas, apiladas y aisladas entre sí. A diferencia del rotor devanado, los rotores jaula de ardilla no permiten el acceso al circuito eléctrico del rotor, por lo que no es posible incluir resistencias externas para el control del par (torque). Sin embargo, este hecho no ha impedido, como se mencionó antes, que su uso sea masivo en aplicaciones motrices de todo tipo. Para ilustración, la Fig. 1 resume una serie de imágenes contenidas en una patente de un motor con rotor jaula de ardilla, fechada en el año 1948.

*Figura 1 Parte de una patente de la fabricación del rotor jaula de ardilla (Fuente: Google Patents)*

### Fenómeno de la inducción

Cuando un arreglo trifásico de bobinas, colocadas en un estator, se energizan con potencia trifásica sinusoidal, se producirá una fuerza magnetomotriz giratoria, con amplitud constante, distribuido sinusoidalmente por el entrehierro. Esto se conoce como el *principio del campo magnético giratorio*. Si ahora se evalúa el efecto que tendrá este campo giratorio sobre el rotor jaula de ardilla, se debe considerar el fenómeno de la inducción. Como el campo magnético se desplaza atravesando las barras del rotor, se inducirá tensión en sus extremos, de forma similar a lo que hace el primario de un transformador en el secundario. A diferencia del transformador, en el rotor jaula de ardilla las barras están en corto circuito por medio de los anillos terminales. Esto proporciona un camino para el flujo de la corriente inducida. Este flujo de corriente forma un campo magnético. El campo magnético tendrá polaridad inversa al del estator, según lo explica la Ley de Lenz. Estas polaridades opuestas se atraerán, provocando el giro del rotor,



y en definitiva, el eje del motor. La tensión inducida en el rotor es función de tres aspectos, que son: *i)* la velocidad relativa de las barras respecto al flujo magnético del estator; *ii)* la densidad del flujo magnético del estator; y, *iii)* la longitud de la barra. Si se asume que la densidad del flujo de estator y la longitud de la barra son constantes, el par producido por el motor será función de la velocidad relativa de las barras respecto del flujo de estator. Esto se conoce como el *principio de la inducción y producción de fuerzas*. La Fig. 2 es una "imagen instantánea" que resume los efectos explicados anteriormente en un rotor de 12 barras, y sometido a un campo giratorio de 2 polos. Se puede ver en la figura la representación de las fuerzas en las barras: en las barras superiores tienen una dirección a la derecha, en las inferiores la dirección es a la izquierda (lo anterior sigue la regla de la mano derecha). En definitiva, este rotor girará en el sentido de las manecillas del reloj. Un detalle sobresaliente lo presentan las 2 barras que no tienen indicación de corriente inducida, ya que en estas barras se anula la tensión inducida, ya que el campo y la velocidad son paralelas (NOTA: en estas 2 barras el campo es uniforme, y no se cumple el principio de la inducción electromagnética de Faraday).

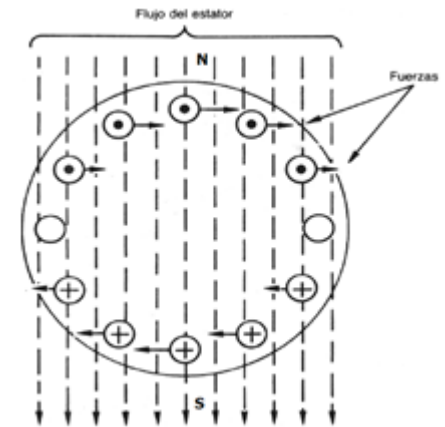


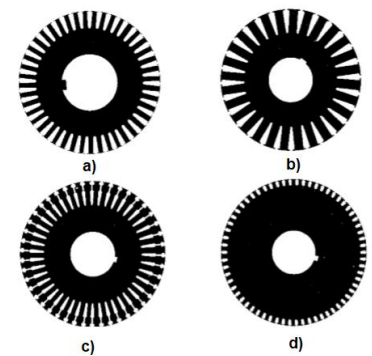
Figura 2 Efectos de la inducción en un rotor jaula de ardilla de 12 barras

Tipos de rotores y diseños NEMA/categorías IEC

La forma y el material de la barra definirán si el rotor es de *baja resistencia*, como los de las Figs. 3 a) y b), o de *alta resistencia* como el de la Fig. 3 d). Esto definirá el tipo de *Curva Par-Velocidad*, lo que a su vez establecerá el Diseño NEMA o Categoría IEC del motor, según sea el caso.

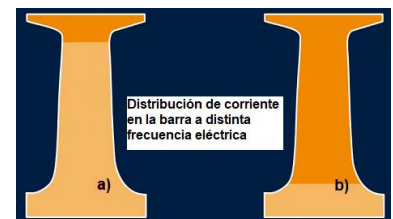
Figura 3 Formas de laminaciones del núcleo de rotor (Fuente: Máquinas Eléctricas, Chapman)

Por un lado, en NEMA se tienen cuatro diferentes diseños, que son: **A** y **B** para aplicaciones de propósito general (Figs. 3 a) y b)); **D** para aplicaciones de alto par de arranque (Fig. 3 d)); y, **C** conocido como rotor de doble jaula de ardilla (Fig. 3 c)). Por otro lado, en IEC se tienen tres categorías, que son: **N** para aplicaciones de propósito general; **H** para rotores de doble jaula de ardilla; y, **D** para aplicaciones de alto par de arranque.



El comportamiento del rotor durante el arranque se explica por dos fenómenos, estos son: *i)* un cambio de la reactancia versus la resistencia de las barras; y, *ii)* el efecto piel por el cambio en la frecuencia de la corriente de rotor. Esto produce el efecto del cambio de par desarrollado por el motor, desde el arranque hasta la operación estable. Las Figs. 4 a) y b) presentan el efecto piel.

Figura 4 Distribución de corriente en una barra a: a) 50 o 60Hz, y b) 2 - 5Hz, por efecto piel



Construcción

En motores de potencias menores a 500HP (373kW) la jaula del rotor se puede fabricar usando un proceso de fundición de aluminio a presión, porque son mucho menos costosos y se pueden obtener las formas de barra complejas y variables requeridas. Al agregar el material fundido, las barras toman la forma de las ranuras en el núcleo. Si bien, la menor resistencia de las barras de cobre permite una mayor eficiencia como resultado de menores pérdidas de tipo  $I^2R$ , la fundición de aluminio es más popular entre los fabricantes por sus menores costos. Los rotores de cobre fundido también tienen pérdidas misceláneas más bajas, cuando se usa en motores alimentados por variadores electrónicos de velocidad. Sin embargo, el hecho de que el aluminio tenga una temperatura de fusión más baja (660 °C) que el cobre (1083 °C), hace que sea más fácil de fundir.

Hay dos procesos de fundición a presión de uso común para rotores de aluminio y cobre, que son la *fundición por inyección* y la *fundición centrífuga*. Los primeros pasos para ambos procesos son los siguientes: *(i)* fabricar las laminaciones del núcleo y apilarlas bien alineadas (NOTA: si se requieren ranuras de rotor sesgadas (inclinadas), las laminaciones deben orientarse para proporcionar esta característica); *(ii)* los moldes se instalan en cada extremo del núcleo del rotor y se aplica presión axial al conjunto; y, *(iii)* el conjunto de núcleo y molde a menudo se calienta antes de inyectarles el cobre o aluminio para evitar un enfriamiento rápido del material fundido. El aluminio se calienta a alrededor de 843 °C antes de inyectarse en la cavidad del núcleo/molde. En los videos siguientes se puede ver el proceso de fabricación de fundición a presión del rotor con aluminio (hacer clic sobre Parte #1 y Parte #2):

- Fabricación de un rotor jaula de ardilla: [Parte #1](#)
- Fabricación de un rotor jaula de ardilla: [Parte #2](#)

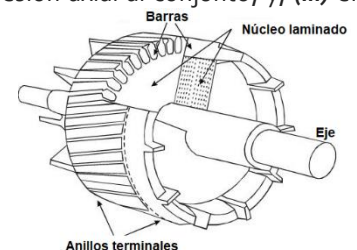


Figura 5 Partes de un rotor jaula de ardilla

El resultado final de la construcción se muestra en la Fig. 5, detallando el rotor y sus diferentes partes.

En motores de mayor potencia a 500HP (hasta 15,000HP), o bien, con diseños especiales, la construcción del rotor se realiza usando barras de cobre. Esto implica la colocación una a una de todas las barras, y la fijación de los anillos terminales por medio de soldadura. Las Figs. 6 a) y b) se muestra una sección de un rotor de cobre.

Figura 6 a) y b) Detalles de la construcción de un rotor jaula de ardilla con barras soldadas

El material utilizado en las barras del rotor se clasifica según su composición, lo que dará una característica de conductividad. Esto es parte del diseño original del fabricante. Además, tendrá un efecto directo en la Curva Par-Velocidad del motor. La Tabla 1 presenta la conductividad de varios materiales que son utilizados comúnmente en la fabricación de un rotor jaula de ardilla.

Tabla 1 Algunos materiales de barras de los rotores jaula de ardilla (Fuente: EASA)

Material	Conductividad	Composición
Cu (Cobre)	~100%	Barras de cobre estirado en frío
M2	50-55%	~99% aluminio puro
M30	20%	Latón (65% cobre, 35% cinc)
M40	35%	Barras de bronce (98.25% cobre, 1.75 % estaño)
M45	60-100%	Cobre de chatarra fundida
M53	44%	Bronce comercial (90% cobre, 10% cinc) fundido
M63	13%	Aluminio-bronce (86% cobre, 9-11% aluminio, 0.75-1.5% hierro) fundido

### Principales fallas

Distintos estudios de ocurrencia de fallas en motores eléctricos, establecen que el rotor representa una tasa de fallas del 8 al 12% del total (Estudios del EPRI e IEEE de EE.UU.). Dejando de lado las fallas en el eje del rotor, la siguiente es una lista de las posibles fallas en el rotor jaula de ardilla y el respectivo síntoma (o efecto):

1. **Barras rotas:** una barra rota se puede producir por los efectos térmicos de expansión/contracción durante la operación. Especial cuidado se debe tener con no exceder la cantidad de arranques por hora y no sobrecargar el motor durante el arranque.
2. **Anillos terminales abiertos:** por el mismo fenómeno de las barras rotas, los anillos terminales puede desprenderse de las barras. Como el mostrado en la Fig. 7. Tener cuidado si el motor debe funcionar en un entorno que contenga sulfuro de hidrógeno, los materiales de soldadura no deben contener fósforo, para evitar que se debiliten los puntos de unión.
3. **Deficiencia de material en las barras (porosidad, mala conductividad):** este es un defecto de fábrica, por posibles burbujas de aire durante el proceso de fundición.

*EFECTO (S) de 1., 2. y 3.:* Problemas para arrancar o mantener la carga, y vibración fuera de los niveles permitidos.

4. **Puntos o zonas calientes en el núcleo laminado:** cuando se pierde el aislamiento inter-laminar, aparecen las corrientes parásitas que aumentan las pérdidas y el calor producido por el rotor.

*EFECTO (S) de 4.:* sobre temperatura en el rotor y eje del motor.

5. **Excentricidad:** en un motor ideal, el rotor debe estar centrado y alineado en el núcleo de estator. Un entrehierro asimétrico se da si el rotor está desplazado de su centro. Esto se conoce como excentricidad. Se producirán fuerzas indeseables sobre el motor.
6. **Desbalance mecánico:** El desbalance se puede definir como una medida que cuantifica la distancia a la que se desplaza la línea central de masa del rotor, de la línea central de rotación.

*EFECTO (S) de 5. y 6.:* vibración fuera de los niveles permitidos.

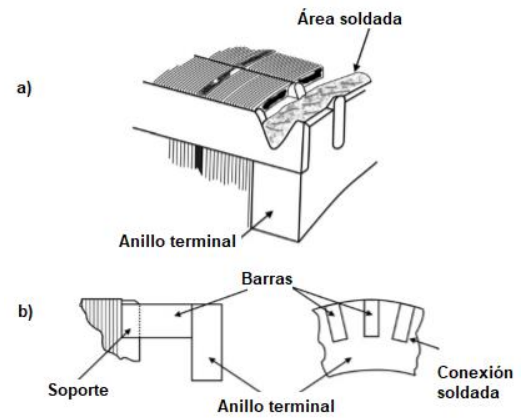


Figura 7 Rotor con una barra rota (Fuente: www.hecoinc.com)