

# Cuaderno Técnico nº 207

## Los motores eléctricos ... mejorando su control y protección



Merlin Gerin  
Telemecanique  
Square D  
Eunea

Schneider  
Electric

La **Biblioteca Técnica** constituye una colección de títulos que recogen las novedades electrotécnicas y electrónicas. Están destinados a Ingenieros y Técnicos que precisen una información específica o más amplia, que complemente la de los catálogos, guías de producto o noticias técnicas.

Estos documentos ayudan a conocer mejor los fenómenos que se presentan en las instalaciones, los sistemas y equipos eléctricos. Cada uno trata en profundidad un tema concreto del campo de las redes eléctricas, protecciones, control y mando y de los automatismos industriales.

Puede accederse a estas publicaciones señaladas con ⇒ **OnLine**, descargando o consultando el documento en pdf, en:

<http://www.schneiderelectric.es/formacion>

Cualquier comunicación con **Schneider Electric España S.A.** pueden realizarla a través de nuestras Delegaciones comerciales (ver contraportada), o bien para temas didácticos dirigirse a:

Centro de Formación Schneider  
C/ Miquel i Badia, 8 bajos  
08024 Barcelona

Telf. (93) 285 35 80

Fax: (93) 219 64 40

e-mail: [formacion@schneiderelectric.es](mailto:formacion@schneiderelectric.es)

Las colecciones de **Cuadernos Técnicos** y de **Publicaciones Técnicas**, forman parte de la «Biblioteca Técnica» de **Schneider Electric España S.A.**

### **Advertencia**

Los autores declinan toda responsabilidad derivada de la incorrecta utilización de las informaciones y esquemas reproducidos en la presente obra y no serán responsables de eventuales errores u omisiones, ni de las consecuencias de la aplicación de las informaciones o esquemas contenidos en la presente edición.

La reproducción total o parcial de este Cuaderno Técnico está autorizada haciendo la mención obligatoria: «Reproducción del Cuaderno Técnico nº 207 de Schneider Electric».

# Cuaderno Técnico nº 207

## Los motores eléctricos ... mejorando su control y protección



### Etienne Gaucheron

Técnico Superior en Electrotecnia, de formación. Después de una breve estancia en Thomson, desarrolla la actividad VVD (Variación de Velocidad y Arrancadores) de Telemecánica en 1970; a continuación de su etapa de venta en Telemecánica completa su formación en Arts e Métiers de París.

Especialista en mando y control de motores, participa en la evolución de los sistemas de variación de velocidad para el control de motores de corriente alterna. Su experiencia se enriquece en los diversos puestos que ocupa: diseñador de sistemas, jefe de producto de variadores para máquinas herramienta, jefe de producto de variadores para motores asíncronos (productos Altivar) y responsable del equipo de marketing del proyecto VVD.

Actualmente es especialista en «aplicaciones» de control de motores en el equipo de anticipación para la actividad PCP (Protección y Control de Potencia) de Schneider Electric.

Trad.: J.M. Giró

Original francés: junio 2004

Versión española: marzo 2005



# Los motores eléctricos

## ... mejorando su control y protección

Actualmente los receptores más utilizados, tanto en la industria como en las instalaciones terciarias, si exceptuamos los sistemas de alumbrado, son los motores eléctricos. Su función, convertir energía eléctrica en energía mecánica, les otorga una especial importancia económica especial; por lo que ningún diseñador de instalaciones y máquinas, ningún instalador ni usuario pueden ignorarlos.

Entre los diversos tipos de motores existentes, los motores asíncronos trifásicos, especialmente los de jaula, son los más utilizados en la industria, y también en los edificios terciarios en aplicaciones de cierta potencia. Además, aunque su mando y control mediante sistemas con contactores está perfectamente adaptado para una gran mayoría de aplicaciones, la utilización de componentes electrónicos, en constante evolución, amplía su campo de aplicación. Entre estas aplicaciones destacan el arranque y parada con los arrancadores-ralentizadores progresivos y una buena regulación de velocidad mediante los variadores-reguladores de velocidad.

Sin embargo, en la industria se siguen utilizando los motores asíncronos de anillos rozantes para ciertas aplicaciones de gran potencia, quedando los motores asíncronos monofásicos para las aplicaciones de pequeña potencia que se utilizan en los edificios.

En aplicaciones que requieren grandes prestaciones, especialmente con par dinámico (o de arranque o por variaciones de carga), y con necesidad de un ajuste fino y muy amplio de la velocidad, es frecuente la utilización de los motores síncronos denominados sin escobillas o de imán permanente, unidos a convertidores.

Este Cuaderno Técnico, después de presentar los diversos tipos de motores eléctricos y su principio de funcionamiento, explica con más detalle la técnica y las particularidades de utilización de los motores asíncronos, asociados a los principales dispositivos tanto de arranque como de variación de velocidad y frenado. Aporta los conocimientos básicos mínimos para entender toda la problemática asociada al control y la protección de motores.

Se aborda también brevemente el estudio de la variación de velocidad de los motores eléctricos. Este tema se trata específicamente en el Cuaderno Técnico CT 208 «Arrancadores y variadores de velocidad electrónicos». En un Cuaderno Técnico de próxima aparición se desarrolla el tema de la protección de motores.

<b>1</b>	<b>Los motores asíncronos trifásicos</b>	1.1 Principio de funcionamiento	<b>p. 5</b>
		1.2 Constitución	p. 7
		1.3 Los tipos diferentes de rotor	p. 8
<b>2</b>	<b>Otros tipos de motores eléctricos</b>	2.1 Motores asíncronos monofásicos	<b>p. 11</b>
		2.2. Los motores síncronos	p. 11
		2.3 Motores de corriente continua	p. 15
<b>3</b>	<b>Utilización de los motores asíncronos</b>	3.1 Motores de jaula	<b>p. 18</b>
		3.2 Motores de anillos	p. 20
		3.3 Otros sistemas de variación de velocidad	p. 21
<b>4</b>	<b>Conclusión</b>		<b>p. 22</b>

# Los motores asíncronos trifásicos

Este capítulo está dedicado a la presentación de los motores asíncronos trifásicos, que son los más utilizados para el arrastre de las máquinas. El uso de estos motores se impone en gran número de aplicaciones debido a sus ventajas: normalizados, robustos, sencillos de mantener, fáciles de instalar y de bajo coste.

La presentación de los otros tipos de motores se desarrolla en el capítulo 2.

En el capítulo 3 se describen y comparan los principales dispositivos de arranque, regulación de velocidad y frenado que se pueden asociar a estos motores.

## 1.1 Principio de funcionamiento

El principio de funcionamiento del motor asíncrono se basa en la creación de una corriente inducida en un conductor cuando éste corta las líneas de fuerza de un campo magnético, de ahí el nombre de «motor de inducción». La acción combinada de la corriente en el inducido y el campo magnético crea una fuerza motriz en el rotor del motor.

Supongamos una espira ABCD en cortocircuito, situada en un campo magnético B, y que puede girar alrededor de un eje xy (figura 1).

Si, por ejemplo, hacemos girar el campo magnético en el sentido de las agujas del reloj, la espira queda sometida a un flujo variable y se crea en ella una fuerza electromotriz inducida que origina una corriente inducida  $i$  (ley de Faraday). Por la ley de Lenz, el sentido de la corriente es tal que se opone, mediante su acción electromagnética, a la causa que la ha creado.

Cada uno de los dos conductores queda por tanto sometido a una fuerza  $F$  de Laplace (de Lorentz, para los Anglosajones), de sentido opuesto a su desplazamiento relativo respecto al campo inductor.

La regla de los tres dedos de la mano derecha (acción del campo sobre la corriente, figura 2) permite definir fácilmente el sentido de la fuerza  $F$  aplicada a cada conductor.

El pulgar se coloca en el sentido del campo del inductor. El índice indica el sentido de la fuerza. El dedo corazón o de en medio se coloca en el sentido de la corriente inducida. Por tanto, la espira queda sometida a un par que provoca su rotación en el mismo sentido que el campo inductor, llamado campo giratorio. Por tanto también, la espira gira y el par electromotor se equilibra con el par resistente.

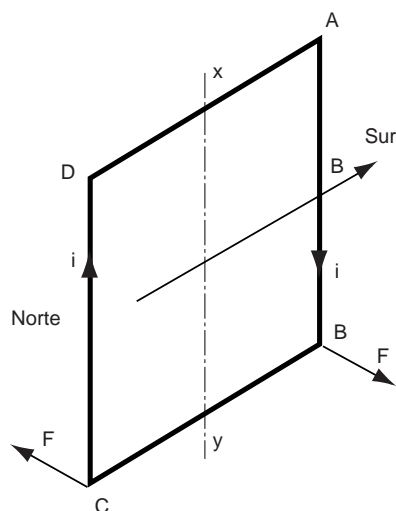


Fig. 1: Creación de una corriente inducida en una espira en cortocircuito.

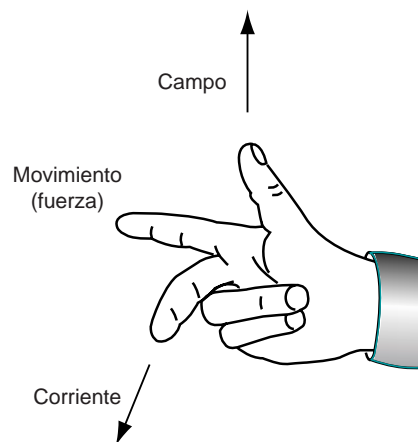


Fig. 2: Regla de los tres dedos de la mano derecha para encontrar la dirección de la fuerza.

### Creación del campo giratorio

Tres arrollamientos, geoméricamente defasados 120°, se alimentan cada uno con una de las fases de la red trifásica de corriente alterna (figura 3). Los arrollamientos están recorridos por corrientes alternas que tienen también el mismo defasaje eléctrico y que producen cada una un campo magnético alterno senoidal. Este campo, siempre dirigido según el mismo eje, es máximo cuando la corriente en el arrollamiento es máxima.

El campo generado por cada arrollamiento es la resultante de dos campos que giran en sentido inverso y que tienen cada uno un valor constante que es la mitad del valor del campo máximo. En un instante dado, t1, de cualquier período (figura 4), los campos producidos por cada arrollamiento pueden representarse como sigue:

- el campo H1 disminuye. Los 2 campos que lo componen tienen tendencia a alejarse del eje OH1,
- el campo H2 aumenta. Los 2 campos que lo componen tienen tendencia a acercarse al eje OH2,
- el campo H3 aumenta. Los 2 campos que lo componen tienen tendencia a acercarse al eje OH3.

El flujo correspondiente a la fase 3 es negativo. Por tanto, el campo tiene sentido opuesto a la bobina.

Superponiendo los tres diagramas, se comprueba que:

- los tres campos que giran en sentido opuesto a las agujas del reloj, están defasados 120° y se anulan,
- los tres campos que giran en el sentido de las agujas del reloj se superponen. Estos campos se suman para formar el campo giratorio de amplitud constante  $3H_{\text{máx}}/2$ . Es un campo con un par de polos.

Este campo realiza una vuelta completa durante un período completo de la corriente de alimentación. Su velocidad es función de la frecuencia de la red (f), y del número de pares de polos (p). Se llama «velocidad de sincronismo».

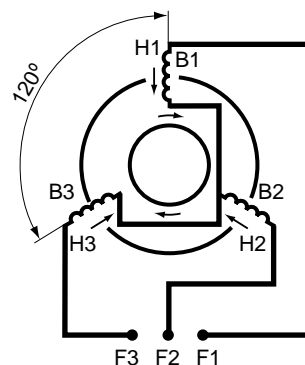


Fig. 3: Principio de funcionamiento del motor asíncrono trifásico.

### Deslizamiento

No puede existir par motor si no existe corriente inducida circulando por la espira. Este par depende de la corriente que circula por la espira, y no puede existir si no existe variación de flujo en la espira. Por tanto, es necesario tener una diferencia de velocidad entre la espira y el campo giratorio. Por este motivo, el motor eléctrico que funciona según el principio que estamos describiendo se denomina «motor asíncrono». La diferencia entre la velocidad de sincronismo (Ns) y la de la espira (N) se denomina «deslizamiento» (g) y se expresa en % de la velocidad de sincronismo.

$$g = [(N_s - N) / N_s] \times 100$$

Durante el funcionamiento, la frecuencia de la corriente rotórica se obtiene multiplicando la frecuencia de alimentación por el deslizamiento. Por tanto, durante el arranque, la frecuencia de corriente rotórica es pues máxima.

El deslizamiento en régimen permanente es variable y depende de la carga del motor y del valor de la tensión de alimentación que se le aplica: es tanto menor cuanto menor es la carga, y aumenta si el motor está subalimentado.

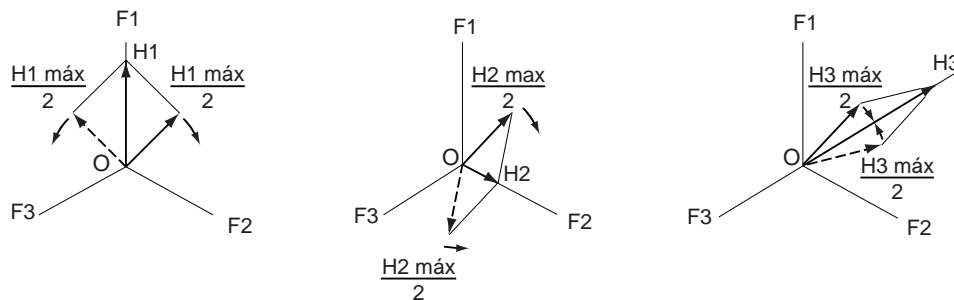


Fig. 4: Campos creados por las tres fases.

### Velocidad de sincronismo

La velocidad de sincronismo de los motores asíncronos trifásicos es proporcional a la frecuencia de la corriente de alimentación e inversamente proporcional al número de pares de polos que forman el estator.

Por ejemplo:

$$N_s = 60 f/p$$

Siendo:

- $N_s$ : velocidad de sincronismo en rpm,
- $f$ : frecuencia en Hz,
- $p$ : número de pares de polos.

En la tabla de la **figura 5** se indican las velocidades del campo giratorio o velocidades de sincronismo, en función del número de pares de polos, para cada una de las frecuencias industriales de 50 Hz y 60 Hz y también para la de 100 Hz.

En la práctica no siempre es posible aumentar la velocidad de un motor asíncrono alimentándolo a una frecuencia superior a la prevista, aún adaptando la tensión. En efecto, se

necesita comprobar si su diseño mecánico y eléctrico lo permiten.

Hay que indicar que debido al deslizamiento, las velocidades de rotación en carga de los motores asíncronos son ligeramente inferiores a las velocidades de sincronismo indicadas en la tabla.

Número de polos	Velocidad de rotación en rpm		
	50 Hz	60 Hz	100 Hz
2	3000	3600	6000
4	1500	1800	3000
6	1000	1200	2000
8	750	900	1500
10	600	720	1200
12	500	600	1000
16	375	540	750

**Fig. 5:** Velocidades de sincronismo en función del número de polos y de la frecuencia de la corriente.

## 1.2 Constitución

Un motor asíncrono trifásico de jaula tiene dos partes principales: un inductor o estator y un inducido o rotor.

### El estator

Es la parte fija del motor. Una carcasa de acero o aleación ligera rodea una corona de chapas delgadas (del orden de 0,5 mm de grosor) de acero al silicio. Las chapas están aisladas entre sí por oxidación o mediante barnices aislantes. El laminado del circuito magnético reduce las pérdidas por histéresis y por corrientes de Foucault.

Las chapas tienen unas ranuras en las que se colocan los arrollamientos estatóricos destinados a producir el campo giratorio (tres arrollamientos en caso de un motor trifásico).

Cada arrollamiento está constituido por varias bobinas. La forma de conexión de estas bobinas entre sí determina el número de pares de polos del motor, y por tanto, su velocidad de rotación.

### El rotor

Es el elemento móvil del motor. Igual que el circuito magnético del estator, está constituido por un apilamiento de chapas finas aisladas entre sí y forman un cilindro claveteado alrededor del árbol o eje motor. Este elemento, por su tecnología, permite distinguir dos familias de motores asíncronos: uno, cuyo rotor se denomina «de jaula», y otro, cuyo rotor, bobinado, se denomina «de anillos».

## 1.3 Los tipos diferentes de rotor

### El rotor de jaula

Existen varios tipos de rotor de jaula, cuyo diseño puede verse en el ejemplo de la **figura 6**. Se citan estos motores empezando por los menos frecuentes:

#### ■ Rotor de jaula resistente

El rotor resistente suele ser de jaula simple (ver más adelante la definición de motor de jaula simple). La jaula está cerrada por dos anillos resistentes (aleación especial, poca sección, anillos de acero inoxidable...).

Estos motores, a par nominal, tienen un gran deslizamiento.

Su par de arranque es elevado, y la corriente de arranque baja (**figura 7**). El rendimiento es bajo debido a las pérdidas en el rotor.

Estos motores se utilizan principalmente en aplicaciones en las que es conveniente que exista deslizamiento para variar la velocidad en función del par, por ejemplo:

□ en el caso de varios motores unidos mecánicamente entre los que debe quedar repartida la carga, como por ejemplo, los trenes de rodillos de una laminadora, o el arrastre de una grúa puente;

□ la función de enrollar-desenrollar con motores Alquist<sup>(1)</sup> diseñados para este fin;

□ necesidad de un gran par de arranque con una corriente de llamada limitada (polipastos o cintas transportadoras).

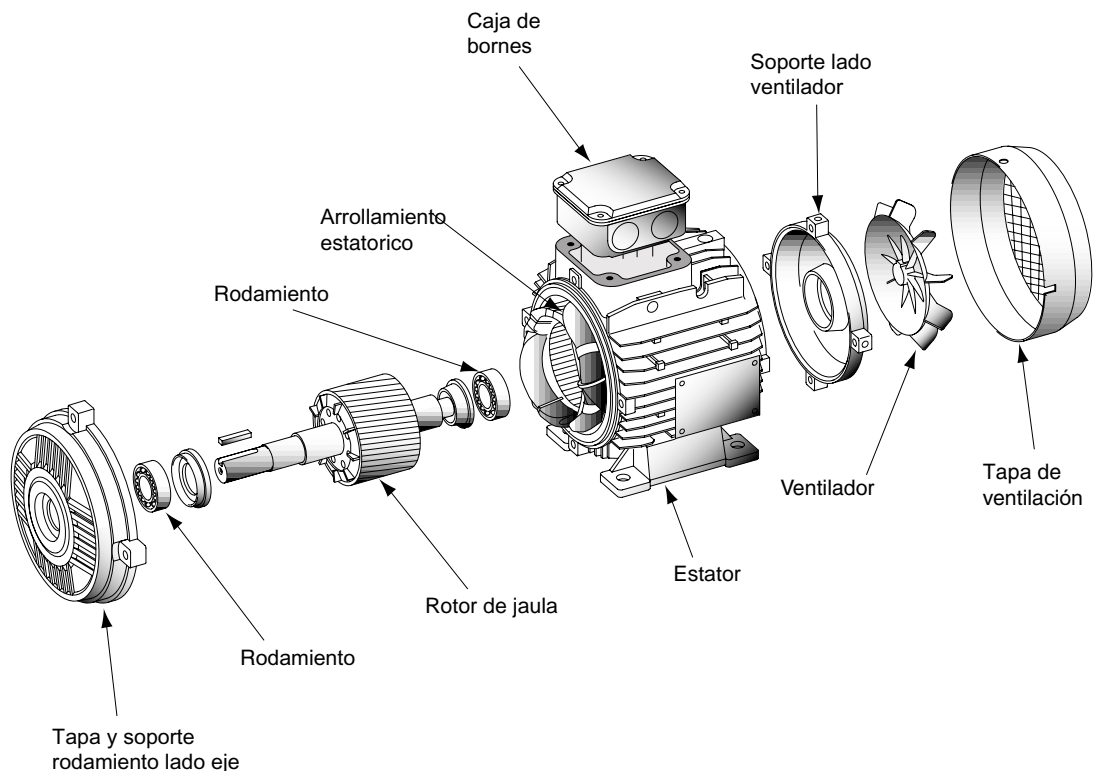
Puede variarse su velocidad cambiando la tensión, pero los convertidores de frecuencia van haciendo desaparecer esta aplicación. Aunque todos los motores son auto-ventilados, ciertos motores con rotor de caja resistente son moto-ventilados (motorización separada de su ventilador).

#### ■ Rotor de jaula simple

En los huecos o muescas dispuestas a lo largo del rotor (en la periferia del cilindro constituido por la pila de láminas) se colocan conductores conectados en cada extremo a una corona metálica; estos conductores desarrollan el par motor generado por el campo giratorio. Para que el par sea homogéneo, los conductores están ligeramente inclinados respecto al eje del motor. El conjunto tiene el aspecto de una jaula de ardilla, de ahí el nombre de este tipo de rotor.

---

1.- Estos motores asíncronos moto-ventilados con un gran deslizamiento se utilizan para variación de velocidad; su corriente de calado es casi su corriente nominal y su característica de par-velocidad, es muy ancha. Con una alimentación variable se puede adaptar esta característica y ajustar el par motor en función de la tracción deseada.



**Fig. 6:** Despiece de un motor de jaula.

Generalmente, la jaula de ardilla está completamente moldeada (únicamente se fabrican estas jaulas insertando los conductores en las ranuras en el caso de motores muy grandes). El aluminio se inyecta a presión, y las aletas de refrigeración, colocadas en la misma operación, aseguran el cortocircuito de los conductores del rotor.

Estos motores tienen un par de arranque relativamente bajo y la corriente de arranque es muy superior a la nominal (figura 7).

Por el contrario, tienen un deslizamiento muy pequeño a par nominal.

Se utilizan principalmente para grandes potencias para mejorar el rendimiento de las instalaciones con bombas y ventiladores. Se asocian también a los convertidores de frecuencia de velocidad variable, con lo que los problemas de par y de corriente de arranque quedan completamente resueltos.

#### ■ Rotor de jaula doble

Consta de dos jaulas concéntricas, una exterior, de poca sección y gran resistencia y otra interior de mayor sección y menor resistencia.

□ Al empezar el arranque, las corrientes rotóricas son de frecuencia elevada, y, por el efecto pelicular que se produce, la totalidad de la corriente rotórica circula por la periferia del rotor y por tanto por una sección reducida de conductores. Así, al principio del arranque, siendo todavía las corrientes de frecuencia elevada, la corriente no circula más que por la

caja exterior. El par producido por la jaula exterior resistente es importante y con baja corriente de llamada (figura 7).

□ Al final del arranque, la frecuencia en el rotor disminuye y resulta más fácil la circulación del flujo por la jaula interior. El motor se comporta entonces aparentemente como si hubiera sido construido como una única jaula de baja resistencia. En régimen permanente, la velocidad es solamente un poco menor que la de un motor de jaula simple.

#### ■ Rotor de ranuras profundas

Es la versión estándar.

Los conductores rotóricos se moldean en las ranuras del rotor, que tienen forma trapezoidal, con el lado menor del trapecio situado hacia el exterior del rotor.

El funcionamiento es similar al de un motor de doble jaula: la intensidad de corriente rotórica varía en función inversa de su frecuencia.

Así:

□ al principio del arranque, el par es mayor y la corriente menor,

□ en régimen permanente, la velocidad es sensiblemente igual a la de un motor de jaula simple.

#### Motor de rotor bobinado (rotor con anillos)

En las ranuras practicadas en la periferia del rotor se colocan unos bobinados idénticos a los del estator (figura 8). Generalmente el rotor es trifásico.

Un extremo de cada uno de los arrollamientos se conecta a un punto común (conexión estrella). Los extremos libres pueden conectarse o a un conector centrífugo o a tres anillos de cobre, aislados y que giran solidarios con el rotor. Sobre estos anillos frotan unas escobillas, a base de grafito, conectadas al dispositivo de arranque.

En función del valor de las resistencias insertadas en el circuito rotórico, este tipo de motor puede desarrollar un par de arranque que llega hasta 2,5 veces el par nominal.

La corriente de arranque es sensiblemente proporcional al par desarrollado en el eje del motor.

Esta solución deja paso progresivamente a los sistemas electrónicos asociados a motores de jaula estándar. En efecto, estos últimos permiten resolver los problemas de mantenimiento (sustitución de las escobillas de alimentación del rotor gastadas, y mantenimiento de las resistencias de arranque), reducir la energía disipada en las resistencias y mejorar de manera importante el rendimiento de la instalación.

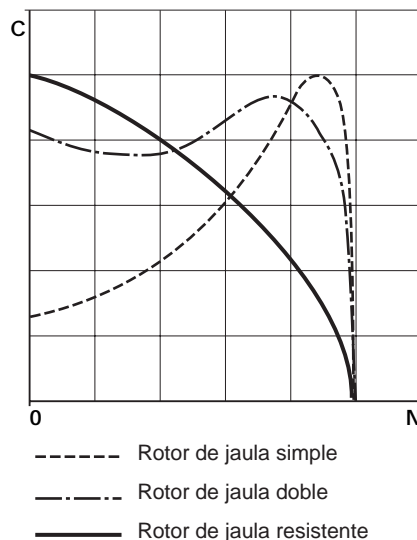


Fig. 7: Curvas par-velocidad de cada uno de los tipos de rotor de jaula.

























