

MOTORES DC SIN ESCOBILLAS

(BRUSHLESS DC MOTORS)

(BLDC)

MOTORES DC SIN ESCOBILLAS

Los llamados "motores DC sin escobillas" ("Brushless DC Motors" o BLDC) son máquinas eléctricas AC de bobinado concentrado con un arreglo de imanes permanente en el rotor que producen el campo magnético de intensidad constante, y un arreglo bobinas concentradas en polos salientes en el estator, conectadas como tres o mas fases.

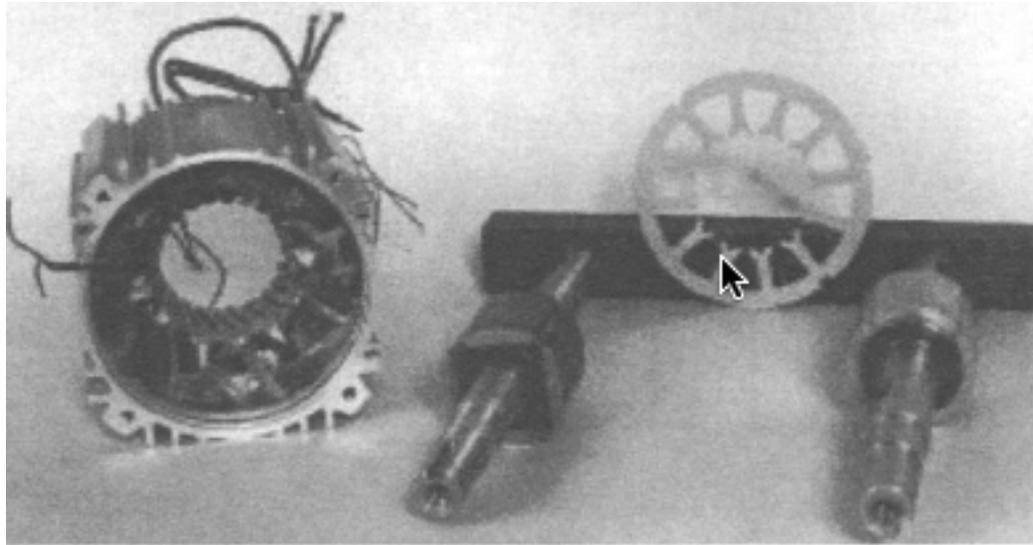
Las fases del estator se alimentan en secuencia con un sistema de tensiones polifásicas alternas (sinusoidales o, mas normalmente, trapezoidales), generadas por medio de un circuito conversor DC/AC (un "inversor"), lo que produce un campo magnético que gira en el espacio.

La interacción del campo magnético de rotor con el del estator genera un par aplicado sobre el rotor que lo hace girar; la secuencia de alimentación de las fases se controla en base a la posición del rotor de forma que los campos se encuentran colocados para producir el par óptimo y la velocidad de ambos campos se sincroniza de forma que la frecuencia de conmutación del sistema AC de alimentación es siempre la misma que la velocidad mecánica de giro del rotor, de forma que las características de operación de la máquina BLDC emulen las de un motor DC de imán permanente ("motor DC con escobillas") en lo referente a las relaciones par/corriente y velocidad angular/voltaje.

De acuerdo con la distribución de los imanes en el rotor existen dos tipos de máquinas BLDC:

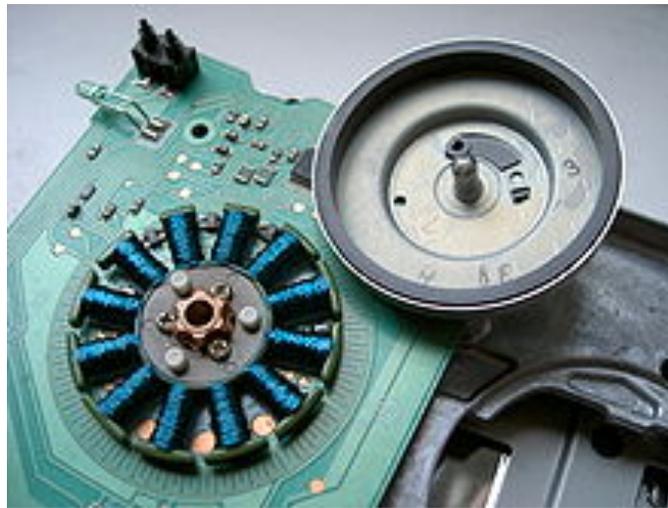
1.- BLDC de campo radial: los imanes se distribuyen en la periferia del rotor, que es esencialmente un cilindro (largo superior al diámetro); como resultado las líneas de campo son paralelas al radio del rotor. Los BLDC de campo radial pueden ser de dos tipos:

1.a.- De rotor interno: El estator es un cilindro hueco, con sus bobinas colocadas en la periferia de la cavidad, y el rotor es un cilindro sólido que ocupa el centro (es la estructura mas común en todas las máquinas eléctricas rotativas).



BLDC de campo radial y rotor interno desarmado; a la izquierda el estator, marcada con la flecha una de las chapas que se apilan para formar los polos salientes y a los lados los dos tipos posibles rotor: de polos salientes, con los imanes sobre la periferia del rotor (izquierda); y con polos no salientes (con los imanes dentro del cuerpo del rotor).

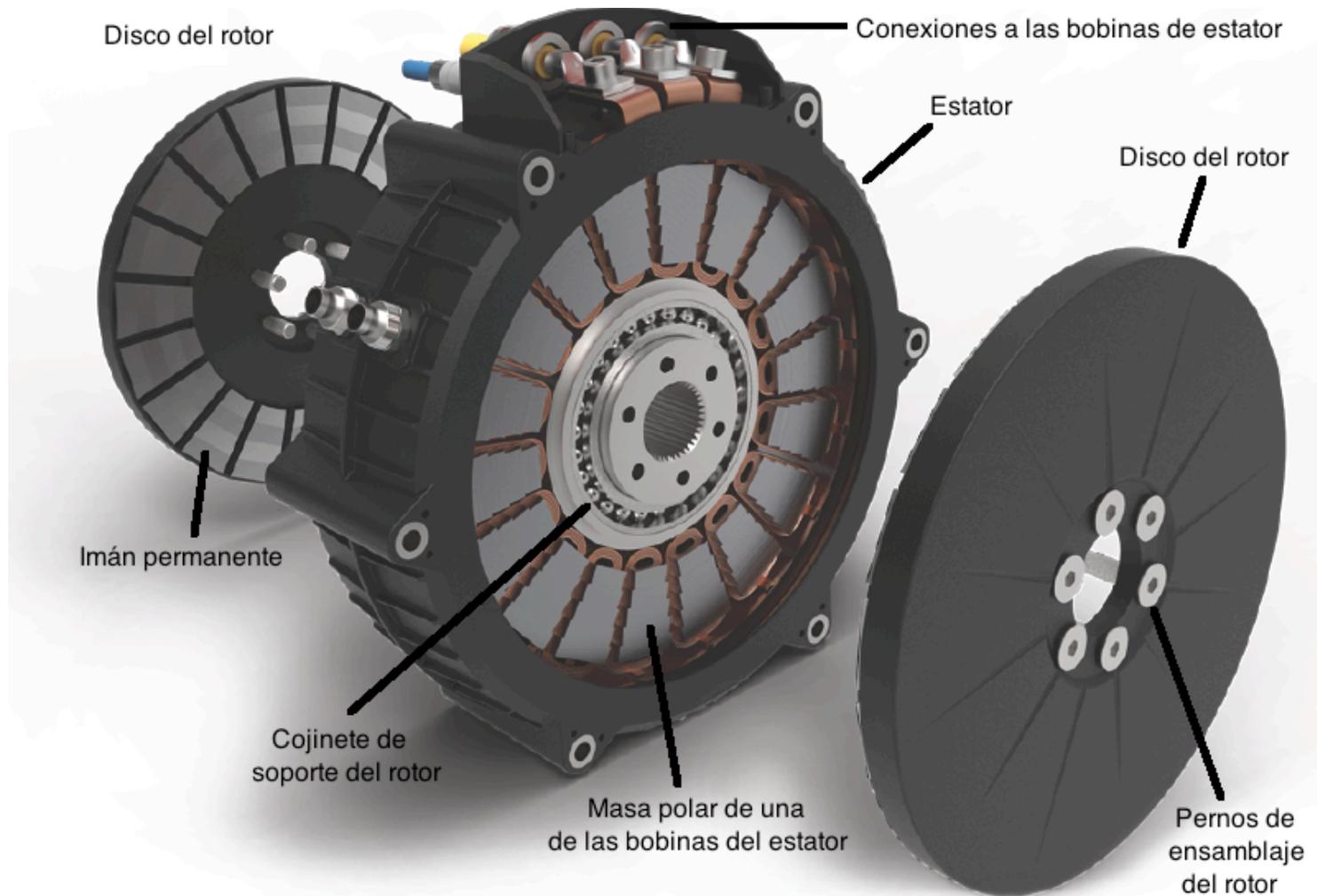
2.a.- De rotor externo: El estator es un cilindro sólido, con sus bobinas colocadas en la periferia, y el rotor es un cilindro hueco que rodea al estator; los imanes se distribuyen en la superficie interna del rotor.



Despiece de un motor BLDC de campo radial y rotor externo de un disk drive de 3,5".

Se observan las 12 bobinas del estator y la cara interna del rotor.

2.- BLDC de campo axial: Los imanes se distribuyen en la cara plana de uno (o los dos) extremos del rotor, que es esencialmente un disco (largo menor que el diámetro); como resultado las líneas de fuerza son paralelas al eje del rotor. Este tipo es mas nuevo y se está introduciendo en el mercado.



Motor BLDC de última generación, 275 mm de diámetro, densidad de potencia 15 kW/kg, cortesía de Magnax.

Tanto los motores BLDC de campo radial como los de campo axial se están ofreciendo para aplicaciones de acople directo, en las cuales el motor se optimiza para operar con alto par y baja velocidad, de forma que se pueda conectar directamente a la carga, sin usar acoples reductores.

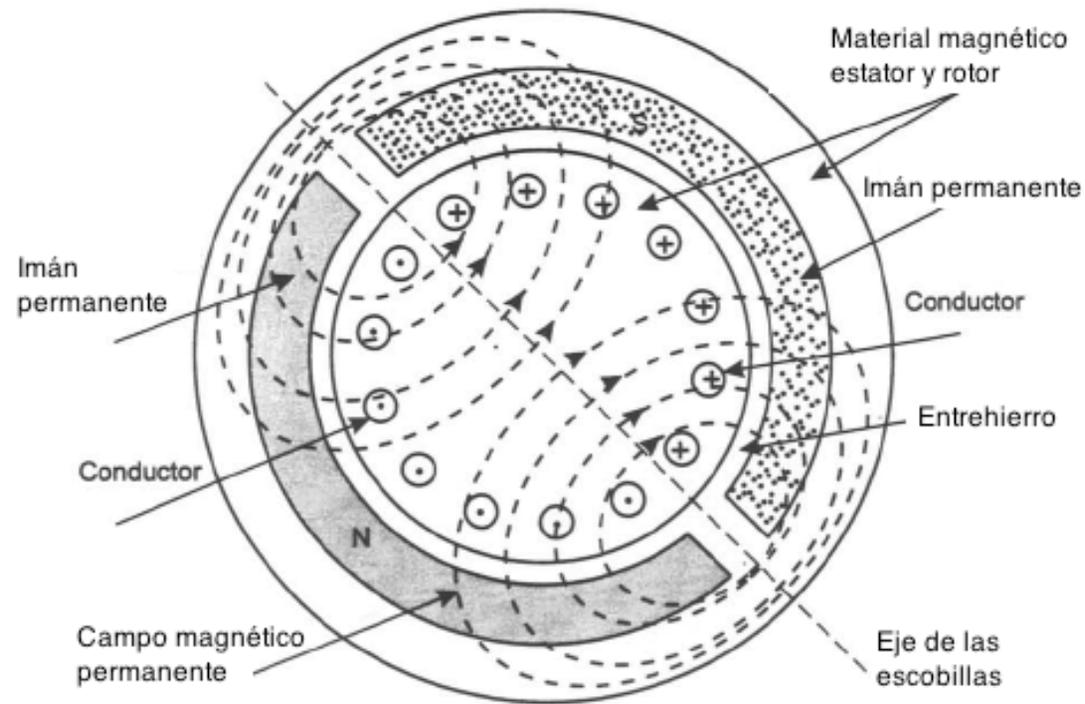
Un área en la cual esta configuración parece especialmente interesante es la de vehículos eléctricos, en los cuales se propone el uso de los llamados “motores en la rueda”, que son motores BLDC de rotor externo, en los cuales el neumático se monta directamente alrededor del rotor, que reemplaza al "ring" convencional, con lo que en principio el vehículo puede tener solo cuatro partes rotativas: las cuatro ruedas, dos o cuatro de las cuales son “motores en las ruedas”.

	Motor de inducción con acople reductor de velocidad	Motor BLDC de flujo radial con acople directo	Motor BLDC de flujo axial con acople directo
Eficiencia	80%-88%	92%-95%	96%-97%
Largo	1.500-3.000 mm	700-1.200 mm	140 mm
Peso	2.000-3000 kg	2400-5000 kg	850 kg
Costo	€	€€	€
Confiabilidad	+	+++	+++
Facilidad de instalación	-	+	++
Costo de mantenimiento	Alto	Bajo	Bajo

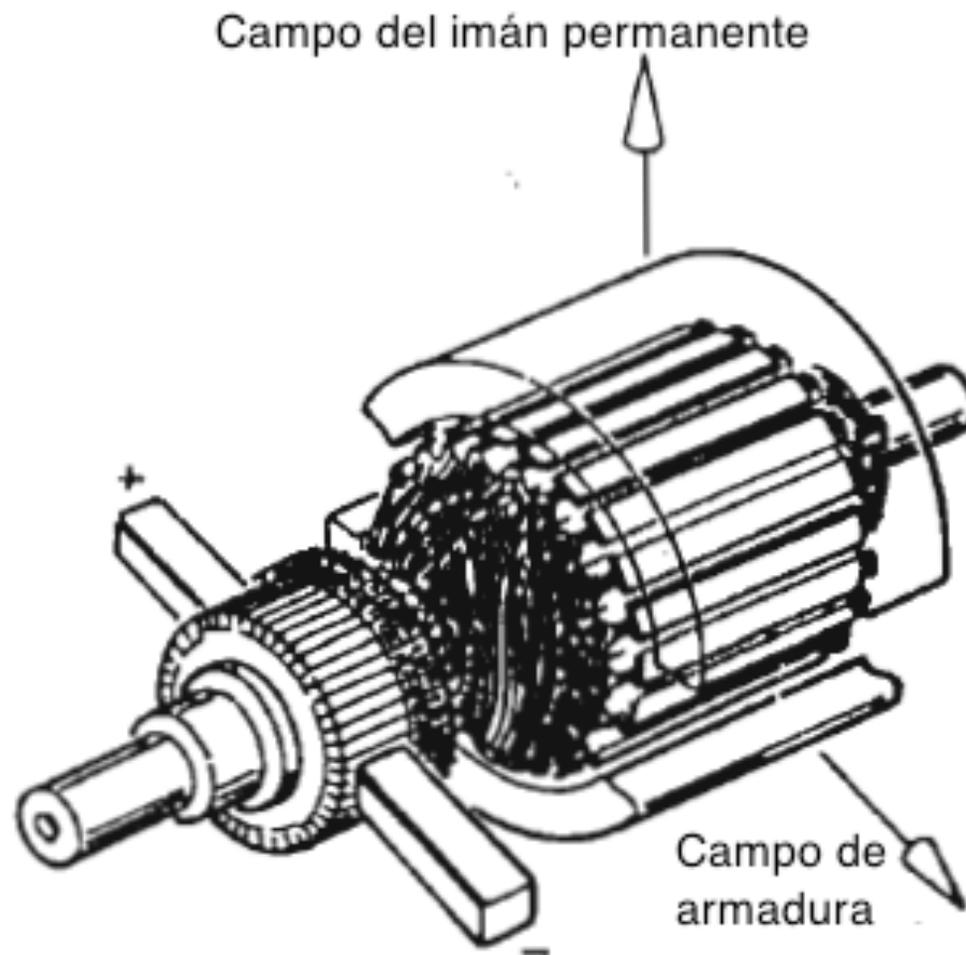
Comparación con un motor DC convencional (DC con escobillas)

En un motor DC de campo generado por imán permanente, la estructura de la máquina produce automáticamente la relación óptima deseada entre el campo del imán del estator y el generado por la corriente de armadura en el bobinado energizado del rotor.

El alineamiento deseado entre los dos campos está definido por la posición de las escobillas que alimentan a los circuitos del rotor (circuitos de armadura) en relación con los contactos del conmutador y queda fijo en el momento en que se ensambla la máquina.



Corte de la máquina DC de imán permanente, mostrando el campo de estator producido por el imán permanente.



Estructura básica de la máquina DC de imán permanente

La posición de las escobillas asegura que cada bobina de armadura quede energizada solo cuando llega a una posición angular donde producirá un campo de armadura ortogonal al del estator.

El motor DC con imán permanente en el estator y conmutador mecánico es relativamente fácil de controlar tanto en par como en velocidad y ofrece características de operación casi ideales como actuador en un servomecanismo.

La armadura contiene un gran número (del orden de cien o mas) bobinas, por lo que el rizado de par que se produce como consecuencia de la conmutación de la corriente de armadura de una a otra bobina es muy bajo.

El uso de un sistema mecánico de conmutación empleado para alimentar en secuencia a las bobinas de armadura tiene las siguientes desventajas:

1.- La fricción entre las escobillas y las delgas del conmutador produce desgaste; esas piezas (especialmente las escobillas) deben ser inspeccionadas regularmente y reemplazadas periódicamente.

2.- El contacto eléctrico entre las escobillas y las delgas del conmutador no es ideal y se pueden producir chispas, lo que limita la tensión de armadura a la que se puede trabajar.

3.- La velocidad de giro del rotor está limitada por la necesidad de mantener un contacto adecuado entre las escobillas y las delgas del conmutador.

Adicionalmente, en una máquina DC convencional ("con escobillas") las pérdidas eléctricas se producen en el circuito de armadura, que está colocado en el rotor, la parte más interna y, por lo tanto, la menos ventilada de la máquina, lo que dificulta la disipación del calor generado durante la operación de la máquina DC convencional.

En el motor DC sin escobillas desaparecen las limitaciones impuestas por las escobillas sobre la velocidad, la corriente y la tensión de armadura, por lo tanto en igualdad de condiciones se puede operar a mayor velocidad, con mayor par y con una tensión de armadura más alta, lo que puede permitir eliminar el transformador reductor entre la alimentación AC y el sistema DC.

Al estar las pérdidas concentradas en el estator, la parte mas externa de la máquina, se reduce el problema de la disipación de calor, y es posible emplear enfriamiento forzado por líquido de ser necesario en aplicaciones de alta potencia, lo que permite usar motores físicamente mas pequeños y ligeros.

Es factible dotar a cada bobinado de sensores de temperatura, para facilitar la acción de las protecciones circuitales.

La ausencia de escobillas reduce la emisión de interferencia de alta frecuencia (RFI), y operar a mayor velocidad.

La velocidad de respuesta es mayor.

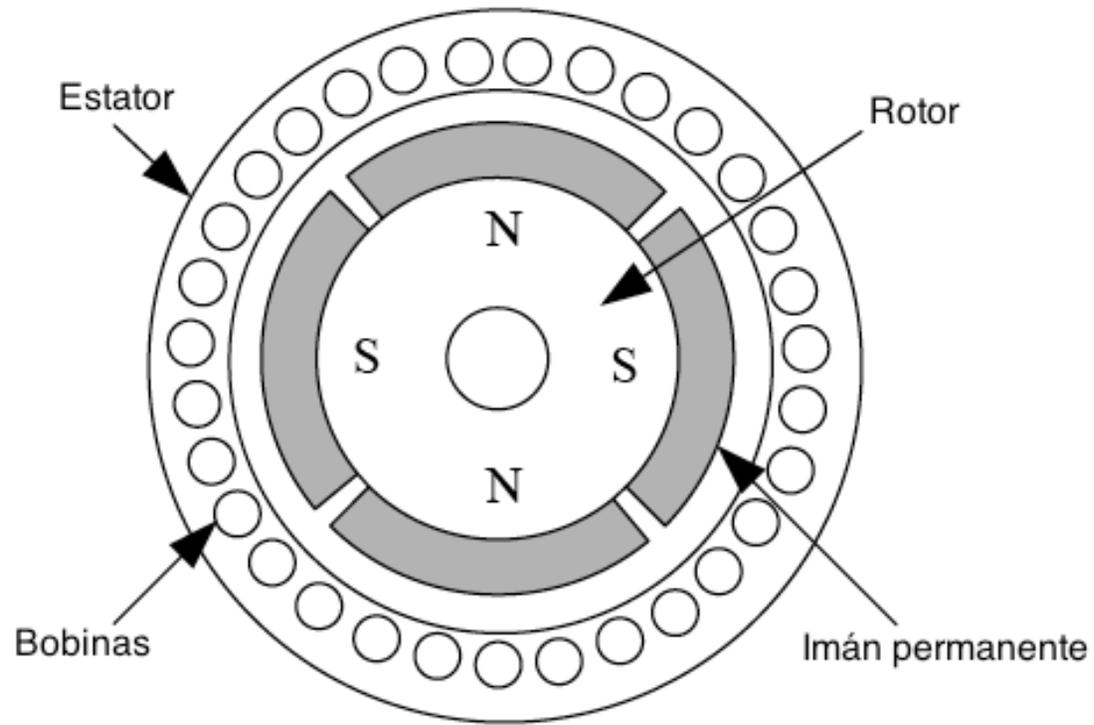
En la actualidad se encuentran en el mercado motores BLDC capaces de operar hasta 250kW a una velocidad de 50.000 r.p.m.

Tipos de máquinas DC sin escobillas (BLDC).

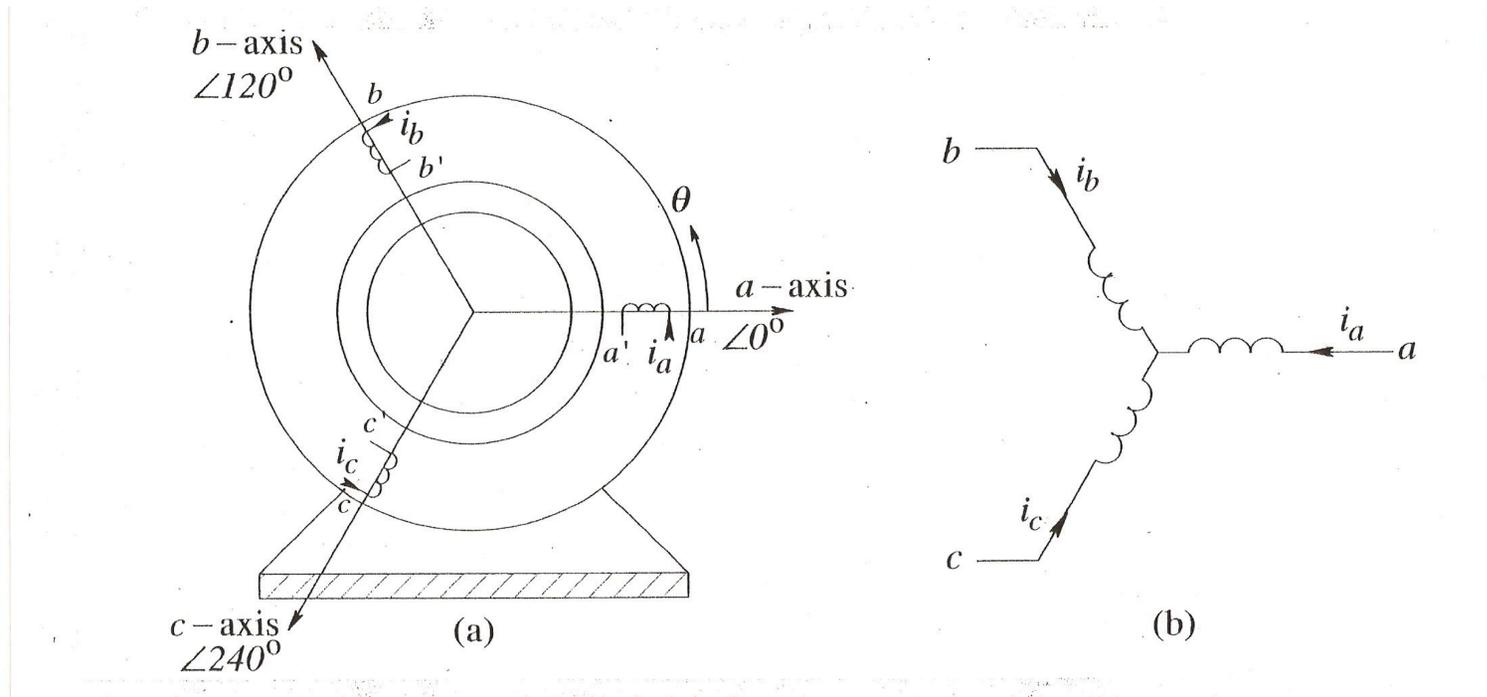
I.- La máquina síncrona de imán permanente con bobinado de distribución sinusoidal.

Esta máquina eléctrica es estructuralmente casi la dual del motor DC de imán permanente: el imán permanente está situado en el rotor, y las bobinas de excitación (usualmente tres o un múltiplo de tres) bobinadas están distribuidas sinusoidalmente en el estator.

En la máquina sincrónica de imán permanente clásica de un solo par de polos (la de bobinado mas simple) las espiras del estator están conectadas formando un sistema de tres bobinas, lo que produce un circuito trifásico balanceado simétrico, que se alimenta conectándolo a un sistema de alimentación eléctrica trifásica, usualmente formado por las tres fases del sistema eléctrico nacional.



Corte de una máquina BLDC de bobinado distribuido.



Esquema equivalente del bobinado de una máquina AC trifásica de un solo par de polos.

- a) Localización de los ejes magnéticos de las tres bobinas en el espacio.
- b) Circuito eléctrico equivalente, conexión en "Y" sin neutro.

Si las corrientes de fase en cada uno de los tres bobinados de una máquina tienen respectivamente las magnitudes i_a , i_b , i_c , y el número de conductores es N_s en cada arrollado, las fuerzas magnetomotrices generadas en cada arrollado serán:

$$\vec{F}_a(t) = \frac{N_s}{2} i_a(t) \angle 0^\circ$$

$$\vec{F}_b(t) = \frac{N_s}{2} i_b(t) \angle 120^\circ$$

$$\vec{F}_c(t) = \frac{N_s}{2} i_c(t) \angle 240^\circ$$

Y la fuerza magnetomotriz resultante en el entrehierro será:

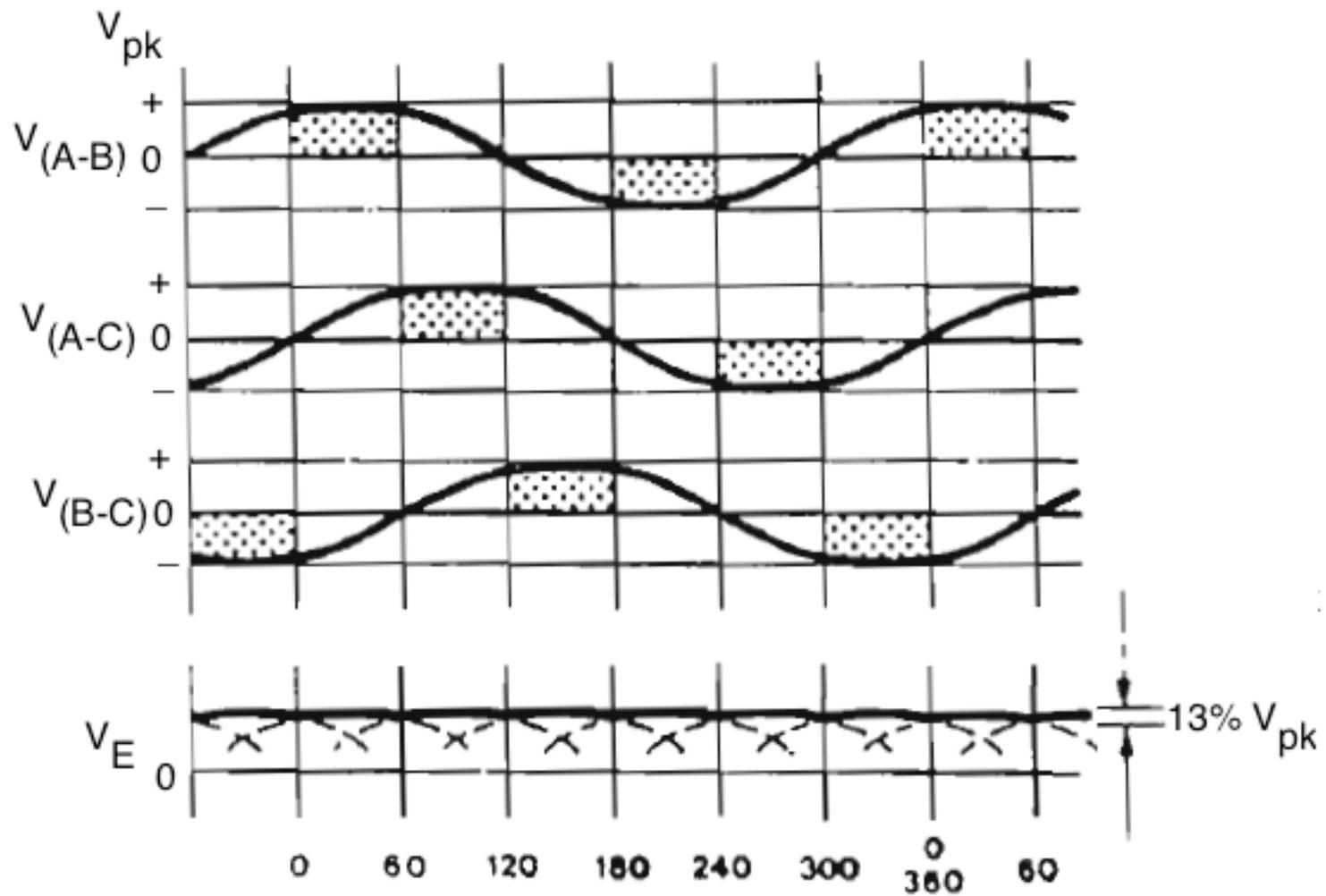
$$\vec{F}_s(t) = \vec{F}_a(t) + \vec{F}_b(t) + \vec{F}_c(t) = \hat{F}_s \angle \theta_s$$

donde:

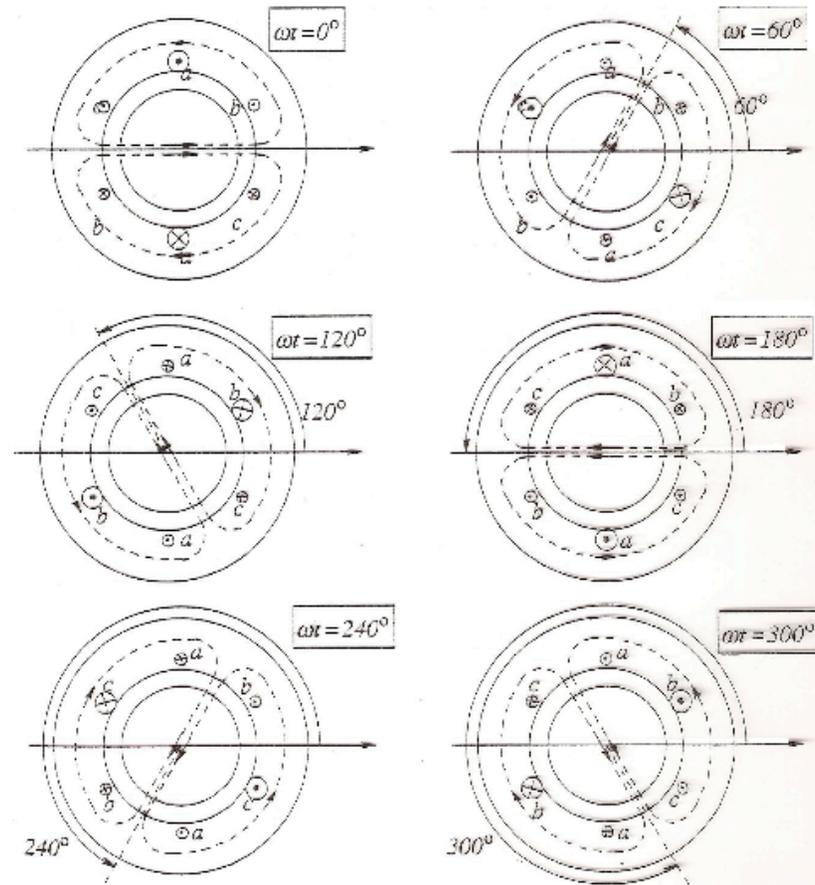
\hat{F}_s es la amplitud del vector espacial de fuerza magnetomotriz resultante

$\angle \theta_s$ es la orientación del vector espacial, referido al eje a

El vector espacial $\vec{F}_s(t)$ representa el valor de la fuerza magnetomotriz en el entrehierro en el instante t, \hat{F}_s representa el valor pico de esta distribución y $\angle \theta_s$ la posición angular en la que se produce ese valor pico.



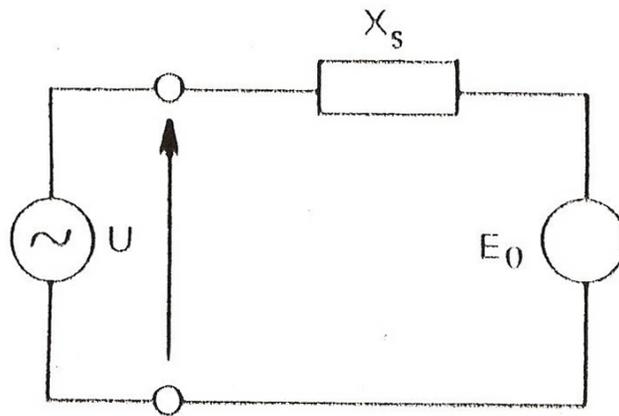
Formas de onda en el motor BLDC con bobinado distribuido sinusoidal.



Posiciones del vector espacial de fuerza magneto motriz en seis instantes del ciclo de rotación.

Este campo interactúa con el del imán permanente, y el rotor se estabiliza (si el par de carga lo permite) girando en sincronismo con el campo del estator.

En estas condiciones el modelo equivalente unifilar de la máquina es:



Que es el equivalente al modelo circuital de la máquina DC, pero definido en régimen sinusoidal en vez de en régimen DC.

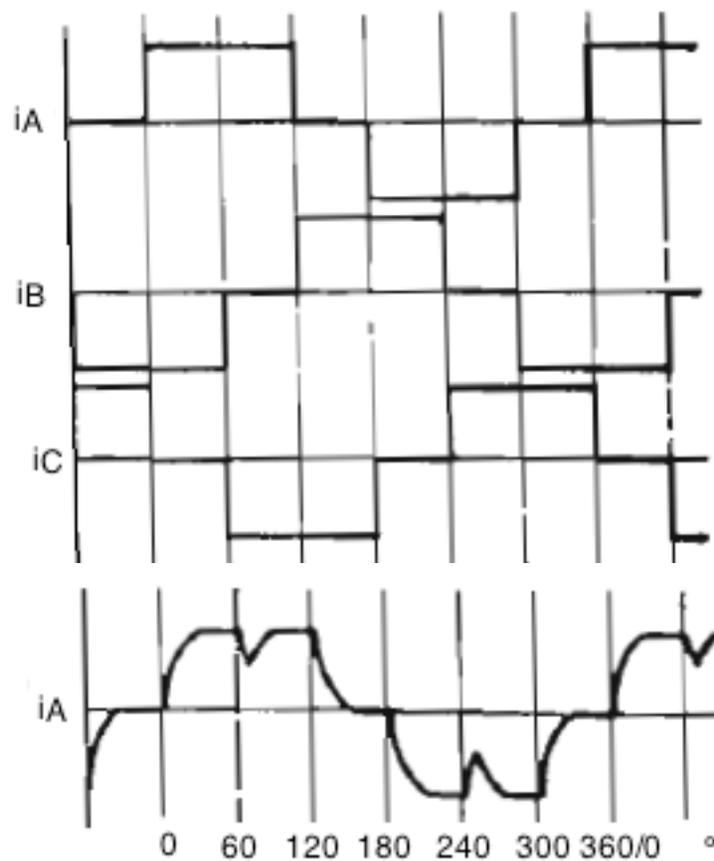
En principio esta máquina supera las deficiencias básicas del motor DC, ya que no tiene conmutador y las pérdidas ocurren ahora en el circuito de estator, que es la parte externa y mas ventilada de la máquina.

Para usarla como servomotor se requiere de una fuente de alimentación trifásica de amplitud y frecuencia variable, lo que en el pasado, antes del auge de la electrónica de potencia, limitaba significativamente su aplicación.

II.- La máquina de bobinado concentrado.

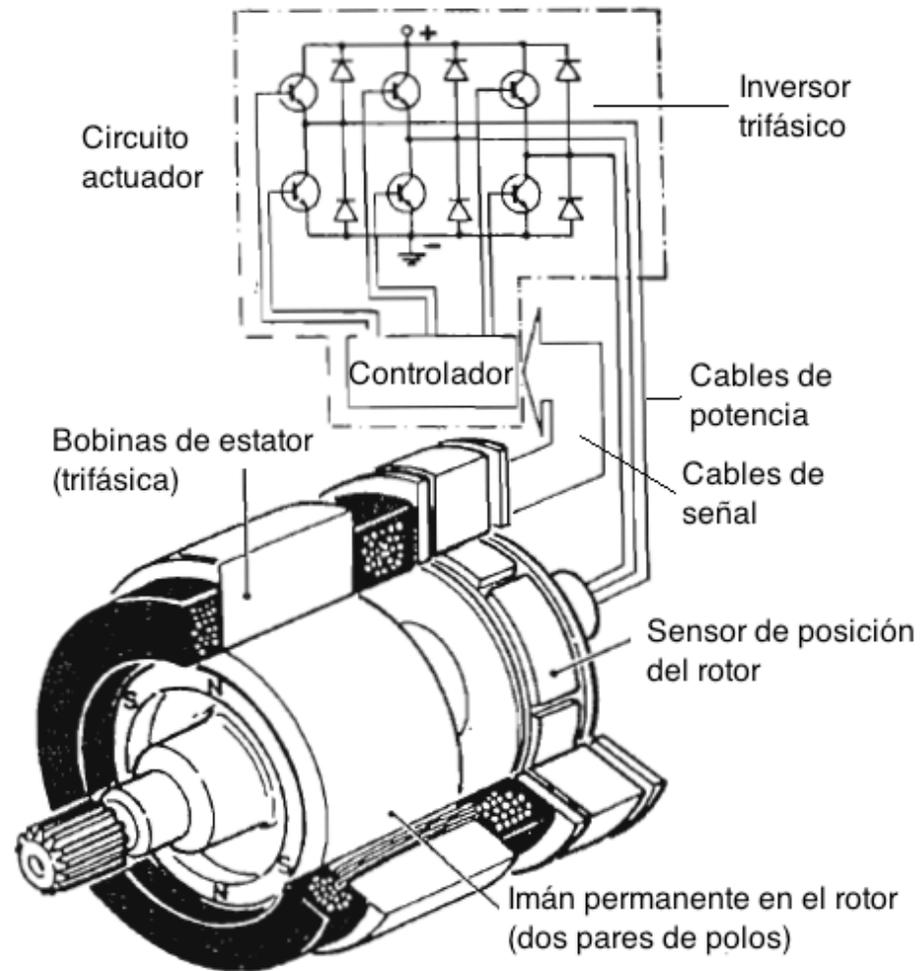
Para simplificar la estructura, la máquina se diseña con polos salientes en el estator (un par por fase, colocados en posiciones diametralmente opuestas), y los bobinados se concentran en dichos polos salientes. En este diseño, una máquina BLDC trifásica tiene 6 polos salientes, separados entre si 60° .

La estructura del bobinado es mas simple, pero tiene una desventaja. Idealmente al energizar una bobina a la vez la corriente que circula es un tren de pulsos rectangulares de tres niveles con frentes de subida y bajada instantáneos, la llamada “onda de seis pasos”.



Formas de onda de corriente en el motor BLDC de bobinado concentrado y alimentación de tres niveles: baja frecuencia de conmutación (arriba); alta frecuencia de conmutación (abajo).

II.- La máquina BLDC con sensores de posición integrados.



Esta máquina eléctrica agrega un sistema sensor de la posición del rotor a una máquina eléctrica de estructura similar a la síncrona de imán permanente.

El sistema sensor puede ser óptico (disco codificado), o magnético, usualmente de tipo "efecto Hall".

Los sensores informan al controlador la posición del rotor en relación con las bobinas, lo que permite activar un conjunto de conmutadores electrónicos que energizan cada una de las bobinas en la posición óptima.

El conjunto sensores-controlador-conmutadores electrónicos reemplaza al conmutador electromecánico del motor DC convencional.

La necesidad de emplear un sistema externo para determinar la secuencia de conmutación de las fases constituye una diferencia fundamental entre la máquina DC convencional y la máquina BLDC con sensores de posición.

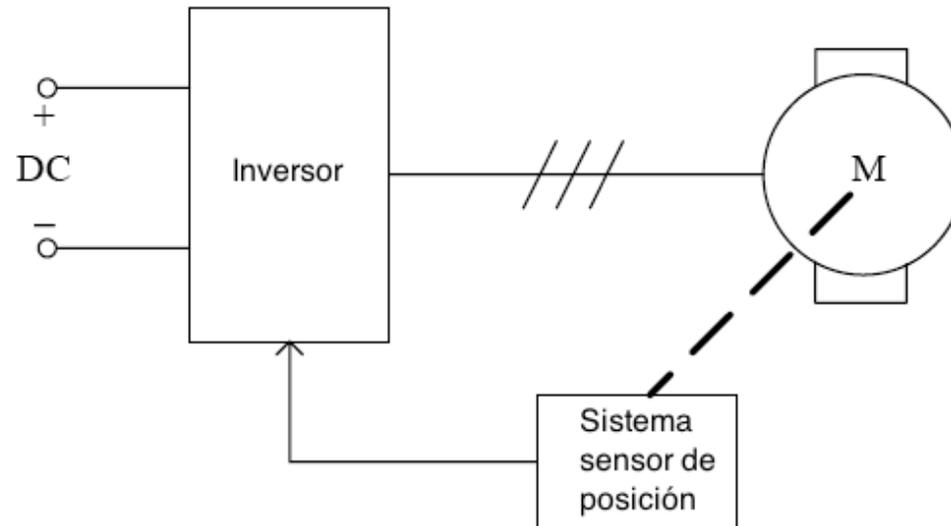
Un motor DC convencional puede operar "en lazo abierto" (esto es sin control) conectado a cualquier fuente DC que sea capaz de entregar la corriente necesaria.

La máquina BLDC con sensores de posición no puede operar por sí sola. Para girar, incluso en "lazo abierto", es preciso conectar el sistema externo que interprete las señales de posición y controle al inversor que la alimenta.

En muchos casos el paquete electrónico de procesamiento de señales de posición y generación de los trenes de pulsos para las bobinas viene integrado con el motor (en las máquinas de baja potencia está incluido en la carcasa de estator) de forma que solo existe un puerto de conexión para los cables de la alimentación DC "de armadura", y la velocidad se controla cambiando el nivel de la alimentación DC, exactamente igual que en un motor DC convencional de imán permanente.

Este es el caso típico de los ventiladores de muchos equipos electrónicos; en esta aplicación lo normal es operar siempre con el voltaje de armadura nominal, a la velocidad nominal, produciendo ventilación máxima

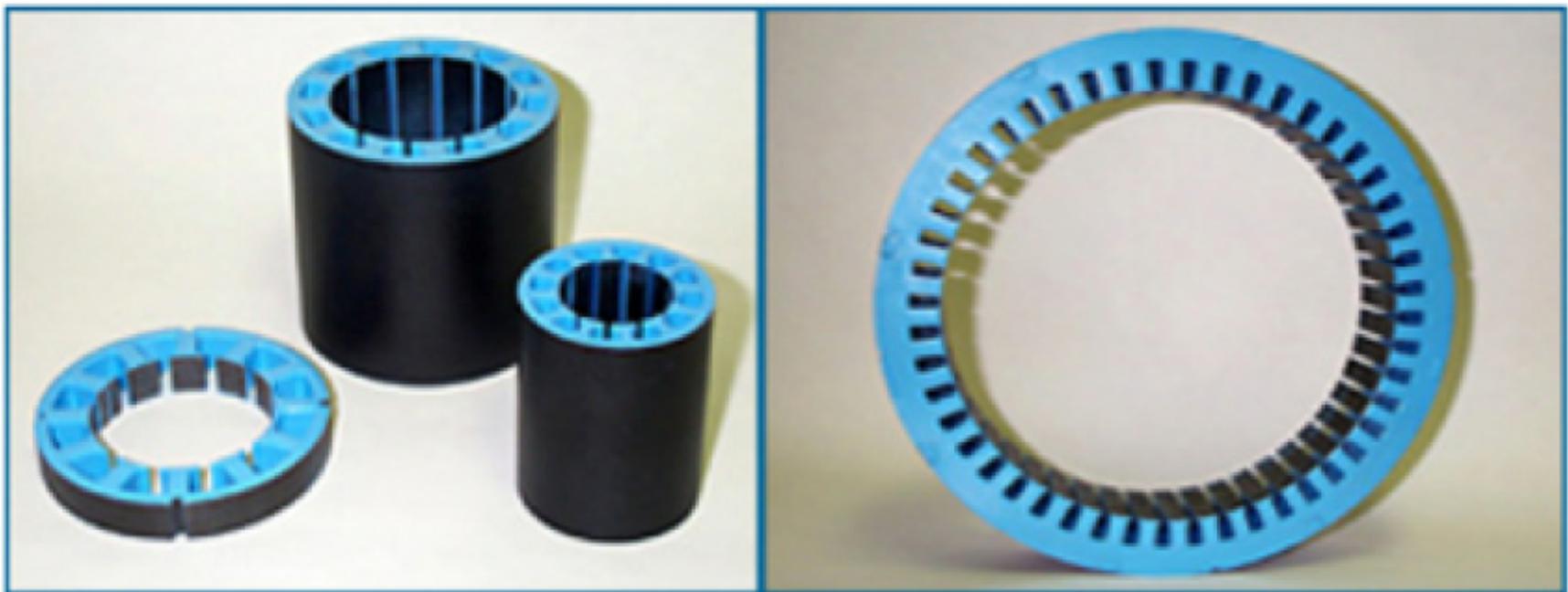
Por lo tanto, el diagrama de bloques real de una "máquina BLDC con sensores de posición" es:



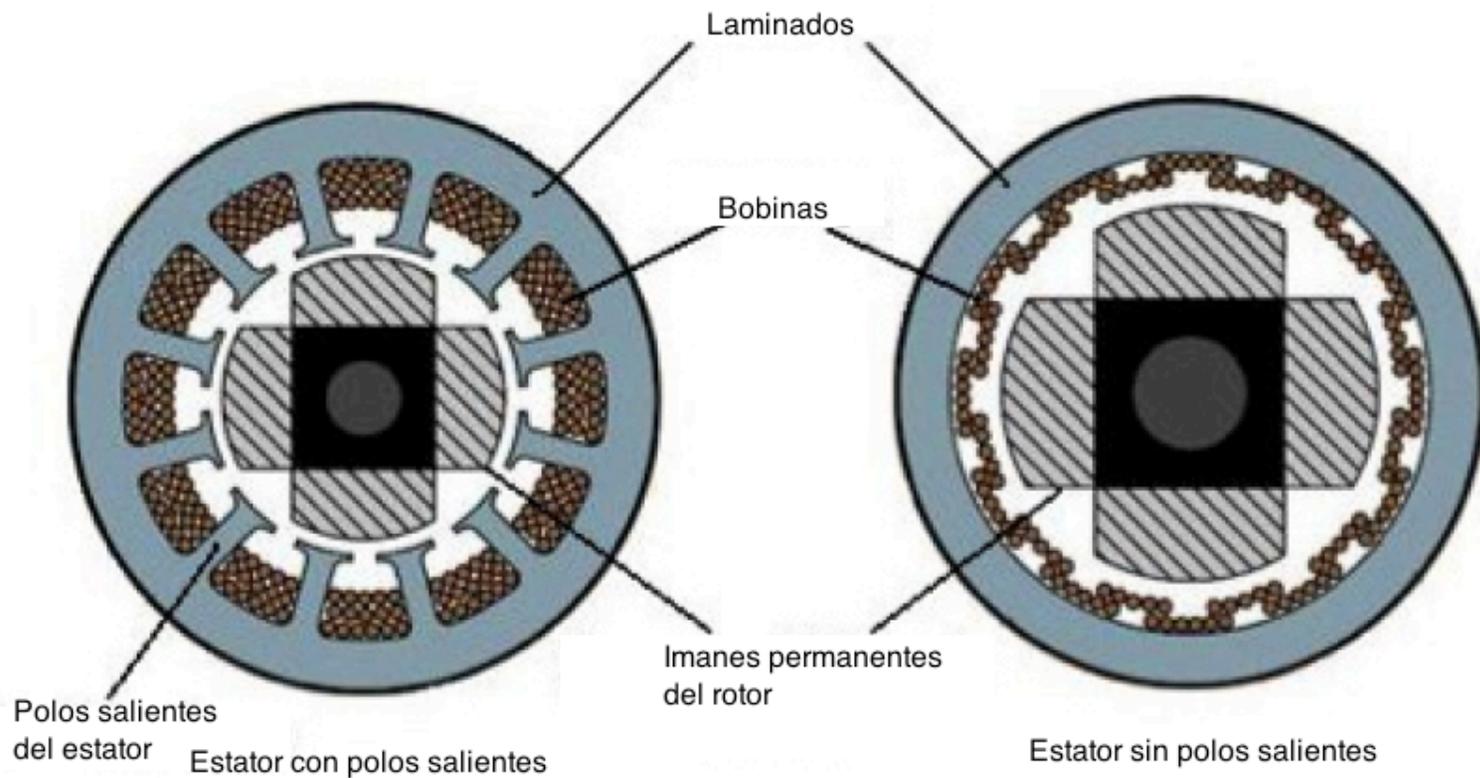
El conjunto máquina BLDC, el sistema sensor de posición e inversor es el verdadero "motor BLDC", capaz de operar "en lazo abierto" cuando se conecta a una alimentación DC de la tensión y potencia necesarias.

Detalles de construcción.

Para reducir las pérdidas en el núcleo, el circuito magnético del estator esta formado por un arreglo de láminas de material ferromagnético.



De acuerdo con la topología que el diseñador seleccione, el estator puede ser de "polos salientes", o liso.

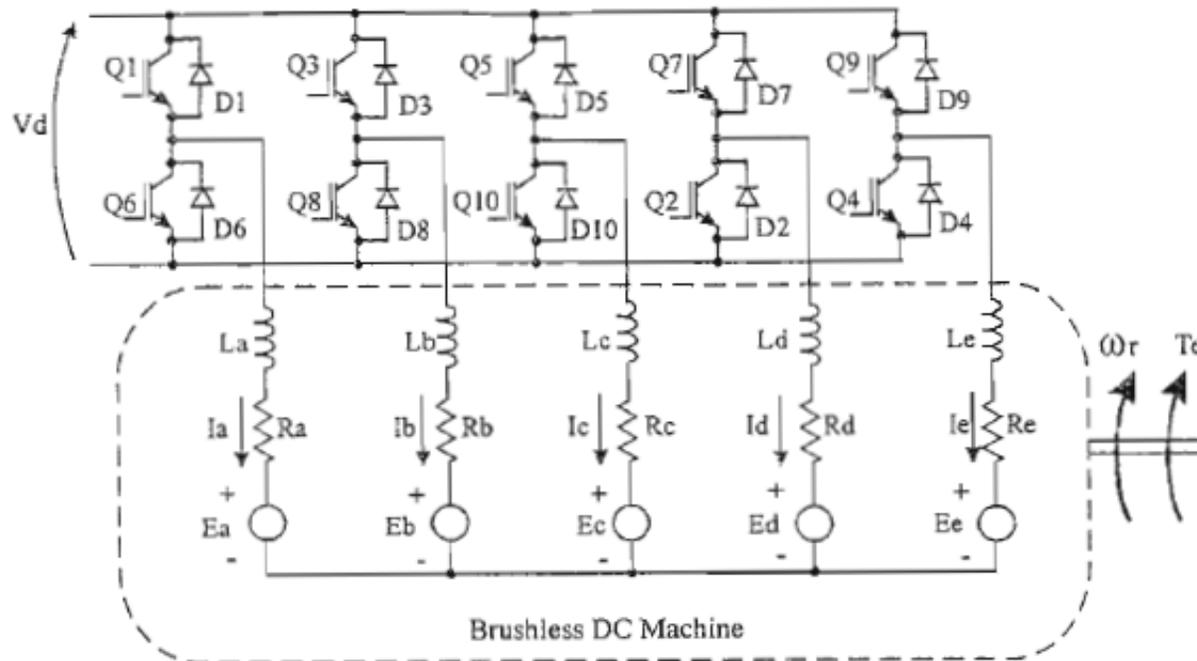


El número de pares de polos magnéticos en el rotor varía en función de la aplicación a la que se destina el motor BLDC. En principio, y en igualdad de los otros factores, a mayor número de polos mayor es el par que se puede producir, pero menor es la velocidad máxima que se puede alcanzar.



Como el campo magnético en el rotor es básicamente constante, el núcleo del rotor puede ser una pieza sólida, no laminada.

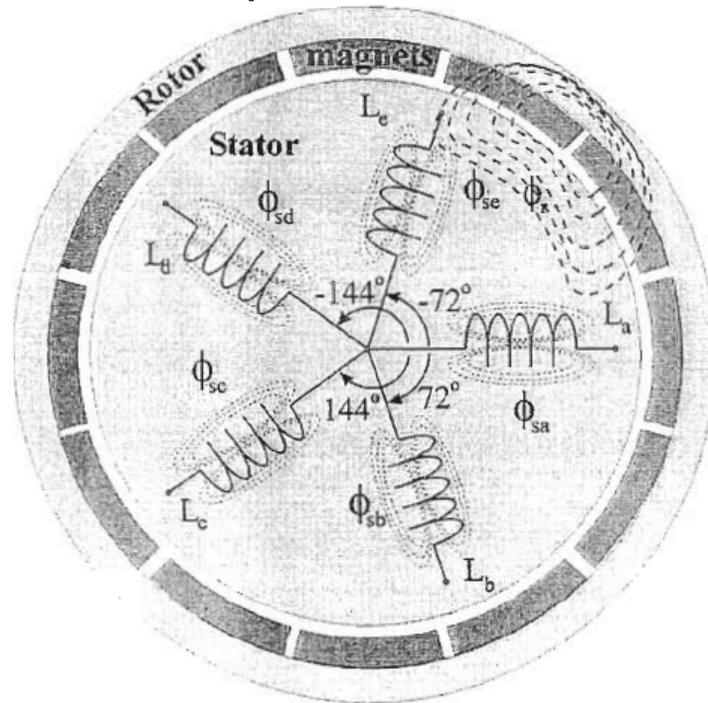
El número de bobinas es usualmente tres (BLDC trifásico), pero es posible encontrar motores con mayor número de fases.



Circuito equivalente y circuito actuador de una máquina BLDC pentafásica.

En principio a mayor número de fases menores las oscilaciones de par, pero mayor complejidad y costo del circuito actuador.

Para aplicaciones especiales (por ejemplo, el "motor en la rueda" usado en algunos vehículos de tracción eléctrica) se han desarrollado máquinas BLDC con "rotor periférico", en las cuales el rotor encierra parcialmente al estator.



Corte esquemático de un motor BLDC pentafásico de campo radial y rotor externo.

Este motor experimental (A High-Torque Low-Speed Multiphase Brushless Machine A Perspective Application for Electric Vehicles; Marcelo Godoy Simoes & Petronio Vieira) tiene las siguientes características:

Diámetro externo: 275 mm.

Largo: 130 mm.

Voltaje nominal: 140 V.

Corriente nominal: 7,5 A.

Velocidad nominal: 750 r.p.m.

Par nominal: 30 Nm.

Potencia nominal: 3.2 hp.

Los imanes son de Nd-Fe-B (Vacodym 344H)

18 piezas por polo.

Total 216 piezas