

Motores BLDC en aplicaciones automotrices BLDC motor in automotive applications

R. Mondragón-Martínez ^{a, *}, O. López- Ramos ^b

^a Área Académica de Maestría en Ingeniería, Tecnológico Nacional de México: Tecnológico de Estudios Superiores de Jocotitlán, 50700, Jocotitlán, Edo. México, México.

^b Área Académica de Ingeniería Electromecánica, Tecnológico Nacional de México: Tecnológico de Estudios Superiores de Jocotitlán, 50700, Jocotitlán, Edo. México, México.

Resumen

El objetivo del trabajo es mostrar las nuevas aplicaciones de motores de corriente directa sin escobillas (BLDC, por sus siglas en inglés), en autopartes de sistemas automotrices. Los avances tecnológicos y nuevos desarrollos en la industria automotriz, demandan mayor calidad y seguridad en los automóviles, la alta competencia ha dejado la necesidad en los fabricantes de autopartes para que evolucionen, mejoren y desarrollen nuevos productos, aplicando las tecnologías en curso que vayan de la mano con estos progresos. Los motores BLDC, son utilizados principalmente en aplicaciones dinámicas como la industria automotriz. Hay una predicción de que los motores BLDC en el año 2030 llegarán a ser la fuerza principal de transmisión de energía en las industrias, reemplazando a los motores tradicionales de inducción. Se estima que el 80% de todas las innovaciones en la industria del automóvil hoy en día están directa o indirectamente habilitadas por sistemas eléctricos y electrónicos.

Palabras Clave: Motor DC sin escobillas, libre de mantenimiento, unidad electrónica de control, durabilidad, motor integrado.

Abstract

The objective of this work is to show the new applications of BLDC (Brushless DC motor) for automotive interior applications. The growth, technological advances, offering higher quality and safety in automobiles had also seen the need for auto parts manufacturers to evolve, develop new products and technologies that go hand in hand with these advances. BLDC motors are used mainly in dynamic applications such as automotive industry. There is a prediction that the BLDC motors will become the main power transmission force in the industries by 2030, replacing traditional induction motors. It is estimated that 80% of all innovations in the automotive industry today are directly or indirectly enabled by electrical and electronic systems.

Keywords: BLDC motor, maintenance-free, ECU, durability, motor on board.

1. Introducción

El crecimiento, los avances tecnológicos, ofrecer mayor calidad y seguridad en los automóviles, se ha visto en la necesidad para que los fabricantes de autopartes evolucionen, desarrollen nuevos productos y tecnologías que vayan de la mano con estos avances. La tecnología de los vehículos eléctricos ahora está en su tercer siglo de desarrollo y es probable que avance rápidamente en los próximos años, (Larminie & Lowry, 2012).

Hoy en día la innovación tecnológica es imprescindible para los vehículos eléctricos e híbridos, lo mismo pasa con los fabricantes de autopartes de los vehículos convencionales (de combustión interna), también están evolucionando, colocando

más autopartes eléctricas y electrónicas que complementan el automóvil, como sensores, accionamientos (de bajo consumo y libres de mantenimiento) y, elementos de seguridad todos conectados a una computadora central, la cual permite tener un control de los elementos.

Las industrias de alta tecnología, como la aeronáutica, la automotriz y la medicina, están sujetas a estándares muy elevados en términos de calidad, rendimiento y seguridad, (Brandtner Hafner, 2019).

En la mayoría de los automóviles, algunos dispositivos electromecánicos son actuados por motores de corriente directa con escobillas (BDC, por sus siglas en inglés) como la bomba de gasolina que emplea un motor de corriente directa con conmutador. La conmutación es uno de los factores

*Autor para la correspondencia: 2022021@tesjo.edu.mx

Correo electrónico: 2022021@tesjo.edu.mx (Rafael Mondragón-Martínez), octaviano.lopez@tesjo.edu.mx (Octaviano López-Ramos).

importantes para determinar el rendimiento del motor. Por lo general, un conmutador está hecho de cobre y de forma cilíndrica (Shigemori & Sawa, 2004).

Un motor BDC tiene una armadura, también llamado inducido, donde se encuentran bobinas de alambre magneto, además de tener un conmutador que está en contacto con las escobillas por medio de las cuales se transfiere la corriente eléctrica a las bobinas de la armadura, que crean un flujo magnético conmutable, estos elementos están montados sobre un eje también conocido como flecha. En este tipo de motor, el ensamble de la armadura y el conmutador son impulsados, por imanes permanentes que se encuentran en una coraza, para realizar un movimiento giratorio y cumplir con su funcionamiento.

Un motor de corriente directa sin escobillas (BLDC, por sus siglas en inglés) cuenta con una parte fija nombrado estator, donde se encuentran las bobinas de alambre magneto, al aplicar corriente eléctrica genera un flujo magnético estacionario entre el estator y el rotor, parte giratoria donde se encuentran los imanes permanentes, impulsando a un movimiento giratorio. Las bobinas en un motor BLDC se accionan mediante interruptores conmutados electrónicamente.

Como principio de funcionamiento para su movilidad, los motores BLDC tienen un sensor Hall para verificar la posición del rotor y controlar la velocidad. En aplicaciones automotrices como los sistemas de enfriamiento, pocos son los que emplean sensores Hall; actualmente se emplean otras tecnologías como el modo sin sensor. Sin embargo, los principales métodos empleados para detectar la posición del rotor son el uso de sensores (el más común de los cuales es el sensor de efecto Hall) y otro empleado es el modo sin sensor (sensor less) (Ahmed Baba, et al., 2023).

Otra configuración empleada en motores BLDC, llamada todo en uno (all in one), incluye el circuito de control dentro del motor, la configuración todo en uno, es considerablemente utilizada en algunas aplicaciones de baja potencia, por ejemplo, bombas de agua y sistemas compactos de ventilación (Hoe Cheon & Tae Uk, 2012). Este tipo de configuración se está empleando actualmente en sistemas de enfriamiento en automóviles. La evolución tecnológica de accionamientos eléctricos y electrónicos empleados en la electrificación en un automóvil es pauta para el cambio de un motor BDC, a un motor BLDC (Wong, 2023).

Para la manufactura de motores BLDC en aplicaciones de sistemas de enfriamiento en automóviles, en la configuración todo en uno, con los avances tecnológicos, exigencias en seguridad y calidad, se han desarrollado nuevos procesos, como el bobinado de agujas para formar las bobinas de estator, la remoción de aislante de alambre magneto para la limpieza de alambre (asegurar la unión), la gran ventaja del bobinado de agujas es la posibilidad de realizar la conexión y terminación del cable directamente dentro del proceso de bobinado (Sahana, et al., 2023). Otro proceso empleado en la manufactura es la soldadura selectiva por ola, como proceso de unión entre la placa de circuito impreso (PCB, por sus siglas en inglés), donde se encuentran los elementos de la unidad electrónica de control (ECU, por sus siglas en inglés) y los alambres de conexión del estator del motor.

El ensamblaje mixto de los elementos de la ECU y los alambres de conexión del estator, combinan las tecnologías de

unión de soldadura selectiva por ola, como la tecnología de montaje superficial (SMT, por sus siglas en inglés) y la tecnología a través de orificios (THT, por sus siglas en inglés), se utilizan para integrar elementos electrónicos de potencia y de señales en una PCB, la soldadura selectiva por ola se utiliza para soldar selectivamente componentes THT sin dañar térmicamente los componentes SMT adyacentes (Seidel, et al., 2022).

Las configuraciones y características de un motor BLDC son importantes para determinar su funcionamiento y rendimiento, así como los materiales empleados como núcleos de laminaciones y alambre magneto. Una nueva tecnología está basada en la configuración todo en uno, donde el motor está montado a la ECU, ahí se encuentra el control de señal del accionamiento y la transferencia de energía sin arnés, se denomina motor integrado (Motor on board technology), esta nueva tecnología se emplea en motores BLDC para aplicaciones en automóviles. El rotor y el estator están hechos de una sola pieza con la PCB, que integra el sensor de posición (Wang, et al., 2020).

2. Motores DC en la industria automotriz

Los motores de corriente directa (DC, por sus siglas en inglés) han tenido papel importante en el desarrollo y crecimiento de la industria automotriz, la tendencia de mejora en la tecnología va en camino a la electrificación de los automóviles, que demandan un aumento considerable de dispositivos de energía electromecánica. Los actuadores y componentes inteligentes diseñados para aplicaciones automotrices tienen que cumplir las normas y especificaciones de los usuarios, cada vez más exigentes en cuanto a emisiones acústicas y sonoras (Cavagnino, et al., 2014). Los motores DC también son comúnmente conocidos como motores de corriente continua (CC, por sus siglas en inglés).

3. Del motor BDC al motor BLDC

Los motores BDC, aún se utilizan por varias razones, entre las más importantes: rango de velocidades, pares de arranque y aceleración de más de su valor nominal, buena regulación de la velocidad y sistemas de control más simples y baratos. La composición de un motor BDC está formada por una carcasa (yugo de campo), bobinado de campo, un núcleo laminado y escobillas.

Los motores BDC tienen la ventaja de ser fáciles de controlar en términos de velocidad y dirección, son relativamente económicos; sin embargo, hay una escobilla en contacto con el conmutador, lo que significa que la rotación a alta velocidad es difícil y la vida útil del motor es corta (Kim, et al., 2022). Los motores BDC y BLDC emplean un bobinado para su funcionamiento, se prefieren los motores BLDC por sus ventajas como alta eficiencia, robustez y capacidad de operación a alta velocidad (Irasari, et al., 2023).

Aunque la física subyacente es la misma entre los motores BDC y los motores BLDC, su construcción, características de rendimiento y medios de control son muy diferentes (Arrow, 2016), algunas de las características principales se enlistan en la Tabla 1.

Tabla 1: Características principales de un motor BDC y un motor BLDC

	BDC motor	BLDC motor
Conmutación	Escobillas mecánicas y conmutador	Conmutación electrónica basada en información de posición del rotor
Tiempo de vida	Corto (desgaste de escobillas)	Largo (sin desgaste de escobillas)
Velocidad y aceleración	Media	Alta
Eficiencia	Media	Alta
Ruido eléctrico	Ruidoso (ruido de arco)	Silencioso
Ruido eléctrico y Torque ripple	Pobre	Bueno (forma trapezoidal o seno)
Costo	Bajo	Medio (con electrónica)
Mantenimiento	Cambio de cojinetes y escobillas	Libre de mantenimiento
Control Velocidad y posición	Medio	Preciso
Rendimiento térmico	Pobre	Bueno
Rango de velocidades	Bajo	Alto

4. Características de un motor BLDC

Un motor BLDC, se considera un motor de alto rendimiento, es libre de mantenimiento, es versátil, además de alto par, velocidad y confiabilidad, el motor BLDC más común se compone de un rotor magnético permanente y tres bobinas de un estator. Para el control en cada paso, dos de cada tres bobinas se utilizan para generar un campo magnético, mientras que la bobina flotante induce una fuerza electromotriz (EMF, por sus siglas en inglés). Los motores BLDC eliminan las escobillas y compensan las deficiencias de los motores DC convencionales con escobillas, lo que resulta en ciclos de vida más largos y mayores eficiencias (Kim, et al., 2022). Normalmente, un motor BLDC convencional de tres fases, tiene tres bobinas de estator en conexión delta o estrella. La conexión de bobinas de un motor BLDC en estrella, se muestra en la Figura 1. Sin embargo, el número de bobinas puede replicarse para obtener una ondulación de par más pequeña (torque ripple) (Janpan, et al., 2012).

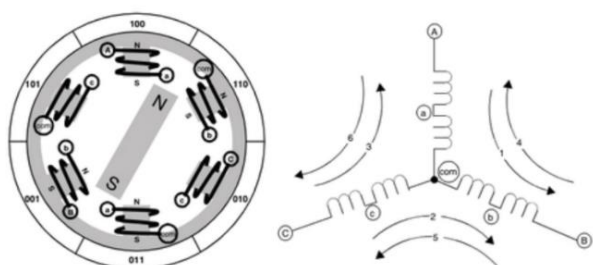


Figura 1: Diagrama de fases simplificado de un motor BLDC, (Janpan, Chairsricharoen, y Boonyanant, 2012).

4.1. Conmutación

Los motores BDC emplean un conmutador cilíndrico montado mecánicamente a una flecha (eje) junto con el

paquete de laminaciones (armadura), por medio del contacto de las escobillas con el conmutador se pasa la energía eléctrica a las bobinas, creando un campo electromagnético, interactuando con el campo magnético de los imanes, colocados en la coraza del motor, logrando que la armadura gire, el intercambio del campo magnético entre la armadura y los imanes se llama conmutación. Los motores de DC con escobillas son en su mayoría similares, usan escobillas para la conmutación, mientras que el motor BLDC se conmuta electrónicamente y no usan escobillas (Jisha, et al., 2022).

La conmutación en un motor BLDC se realiza por medio de la configuración de 3 fases (bobinas del estator) en las que se conecta el final de cada bobina en un mismo punto para hacer una conexión “Y” o llamado punto neutral, esto es impulsado por tres fases, con lo que se llama conmutación de seis pasos, la conexión de cada fase se realiza con cada bobina del estator, el intervalo de conducción de cada fase se da a cada 120 grados o 2 pasos. El punto de conmutación preciso es esencial, para garantizar el rendimiento de par ideal y el bajo consumo de energía para el motor BLDC (Jin, et al., 2022).

En el motor BLDC, solo dos fases de los bobinados del estator trifásico se excitan en cualquier momento utilizando seis vectores de voltaje excitados de forma alternada, es por eso, que la corriente puede fluir solo por dos de los tres bobinados y conmutarse cada 60 grados de ángulo eléctrico (Chun, et al, 2014). Por ejemplo, cuando la fase A y la fase B conducen corriente, la fase C está flotando, la transición de un paso a otro también se llama conmutación como se muestra en las gráficas de corriente en la Figura 2.

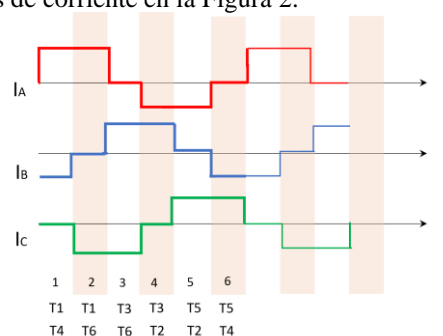


Figura 2: Conmutación de fases de un motor BLDC.

Un motor eficiente, se produce con un bobinado de estator equilibrado, el equilibrio de cada fase del bobinado produce un campo magnético uniforme e interactúa con el campo magnético del imán permanente del rotor, para producir una rotación estable (Asfani, et al., 2021), el estator para un motor BLDC en sistemas de enfriamiento automotriz debe tener las bobinas balanceadas, como se muestra en la Figura 3.

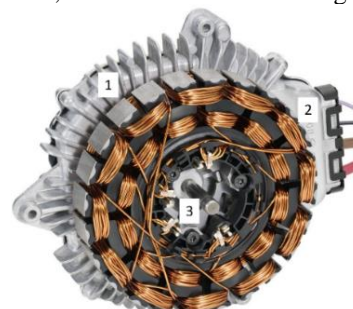


Figura 3. Bobinado de un motor ECM, (Robert Bosch GmbH, 2019).

Otras aplicaciones vienen con la conexión de las bobinas en Delta “Δ”, con el rotor como parte giratoria al exterior. La principal característica de un motor de tipo rotor externo (outer rotor), es la rotación a velocidad constante basada en la inercia (Lee, et al., 2016). El número de bobinas y polos dependerá de la potencia y configuración del motor, como se muestra en la Figura 4.

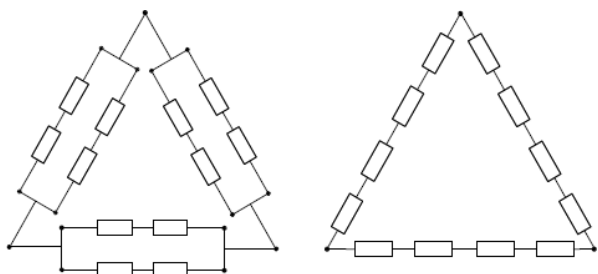


Figura 4: Diagrama de conexión de bobinas en delta, de un estator para un motor BLDC, con rotor externo

La conmutación en un motor BLDC para aplicaciones automotrices se realiza por medio de la conexión y desconexión de las fases y la inversión de estas, creando una onda alterna, de esta forma también se puede conocer la posición del motor, tecnología sin sensor (sensor less). Un bloque comúnmente empleado para la conmutación electrónica es el puente de interruptores electrónicos conocido como B6, donde solo se conducen 2 fases del motor al mismo tiempo, una fase está conectada a la señal positiva de la fuente de tensión mediante un interruptor de potencia y la otra está conectada a la terminal del negativo mediante otro interruptor de potencia (Qian & Zhang, 2017). El esquema eléctrico de un circuito de puente electrónico de 3 fases se muestra en la Figura 5.

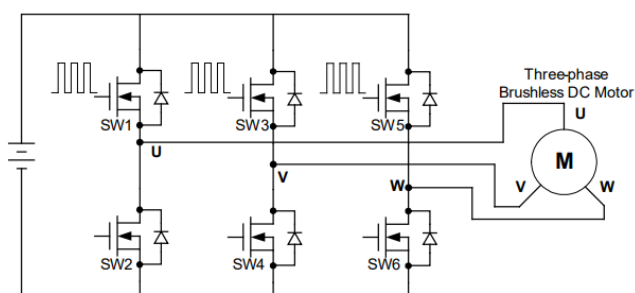


Figura 5: Puente electrónico de 3 fases, (Zhao & Yangwei, 2011)

4.2. Velocidad

Para el control de velocidad de un motor BLDC, comúnmente se emplean sensores para obtener información de la velocidad y posición del rotor, generalmente se utilizan dispositivos como el sensor Resolver, sensor Hall o Tacómetro (Vidlak, et al., 2021)

Debido al sistema de conmutación del puente B6, es uno de los rectificadores e inversores de fase de línea más empleados para el control de velocidad y posición de un motor BLDC en la actualidad, se forma una onda, a la cual podemos modular la duración del pulso, de tal manera que podemos controlar la velocidad por medio de la modulación de ancho de pulso (PWM, por sus siglas en inglés). Para atenuar las variaciones

de velocidad causadas por pares pulsantes o cualquier otra fuente de perturbación que afecte a la velocidad deseable del motor, utilizamos un control de velocidad en bucle cerrado, para lo que se emplea un controlador de velocidad proporcional e integral (PI, por sus siglas en inglés) que determina directamente el ciclo de trabajo de la PWM (Mousmi, et al., 2017), donde T es el periodo y DT es la duración del ciclo en alto o encendido, podemos ver la modulación de ancho de pulso en la Figura 6.

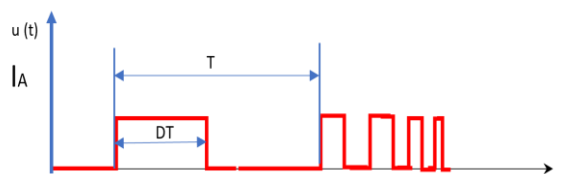


Figura 6: Modo de impulso PWM- ON-OFF

Los motores BLDC para aplicaciones automotrices sin sensor, emplean una unidad ECU para el control de la velocidad y posicionamiento. La unidad de control ECU del motor convierte la tensión en una entrada PWM, la modulación del pulso actúa como interruptor y lo aplica al motor con una serie de pulsos ON y OFF. Controlando el periodo de los pulsos PWM podemos controlar el ciclo de trabajo y la velocidad del motor (Jank Wook & Shifat, 2020). La salida de la unidad de control ECU es básicamente el resultado del desarrollo del control del motor (Rangappla, 2022).

5. Aplicaciones de motor BLDC en sistemas de enfriamiento en automóviles.

Las aplicaciones más comunes de un motor BLDC en los automóviles son los módulos para sistemas de enfriamiento, entre algunos de ellos sistemas de ventilación, sistemas de aire acondicionado sin escobillas (GBB por sus siglas en inglés), módulos de enfriamiento (ECM por sus siglas en inglés), una aplicación de motor BLDC en un sistema de enfriamiento de un automóvil, lo podemos ver en la Figura 7.



Figura 7: Módulo de enfriamiento ECM, (Robert Bosch GmbH, 2019)

Algunos fabricantes de módulos automotrices de sistemas de enfriamiento emplean motores BLDC con un circuito de fases conectado en delta e imanes permanentes en la parte del rotor. Comúnmente, los motores BLDC tienen 2 subensambles, la unidad de control ECU y la mecánica del motor, donde el motor es integrado a la unidad de control ECU (Motor on board technology).

Otra configuración empleada para la conmutación es el empleo de un medio puente (half-bridge) actúa en cada fase

(U, V, W). El controlador de medio puente llama mucho la atención debido a su estructura más simple, menor volumen de ocupación, menor pérdida de energía, esquema de control más fácil y menor costo de producción, ha sido utilizado con éxito en varias aplicaciones (Lu & Li, 2010), de esta forma la etapa de salida configura un puente B6. Los algoritmos del inversor B6 se encuentran normalmente programados en la unidad ECU. Estos algoritmos proporcionan señales de modulación de ancho de pulso PWM a las puertas de los transistores del inversor de potencia del puente B6, basadas en el vector de voltaje giratorio, dado como señal de referencia por el algoritmo de control del motor (Irimia, et al., 2019).

El motor recibe a través de un cable, una señal que viene del módulo central o computadora del vehículo para la operación y control de velocidad del motor. El protocolo de comunicación es tipo PWM o por red de interconexión local (LIN por sus siglas en inglés). Algunos modos de operación de los motores BLDC en sistemas de enfriamiento son:

- Reposo (Sleep mode), ECU inactiva, motor apagado
- En espera (Stand-by mode), ECU activa, motor apagado
- Bucle cerrado (Close loop mode), ECU active, motor encendido, velocidad programada o requerida.

Las condiciones de operación más comunes de un motor BLDC en sistemas de enfriamiento se observan en la Tabla 2.

Tabla 2: Condiciones de operación de un motor BLDC en sistema de enfriamiento automotriz

Característica	Rango
Voltaje de operación	13 V \pm 0.1 V algunos 48 V
Tolerancia de velocidad	\pm 3%
Temperatura de trabajo	110° C
Temperatura ambiente	23 \pm 3 °C
Potencia	240 W hasta 450 W
Velocidad	2000 hasta 3200 rpm

El funcionamiento del motor de imanes permanentes sin escobillas depende de la conversión de energía de eléctrica a magnética y mecánica (Rahmani, et al., 2018).

Las principales características con la que trabaja un motor BLDC en un sistema de enfriamiento automotriz son:

- Control de velocidad
- Velocidad objetivo a través de una señal PWM
- Alta densidad de potencia
- Alta eficiencia
- Funciones de diagnóstico interno
- Monitoreo de temperatura
- Autodiagnóstico
- Detección de bloqueo
- Limite y monitoreo de consumo de corriente

5.1. Tiempo de vida

La vida útil de un motor sin escobillas depende de varios factores, incluida la calidad del motor, las condiciones de funcionamiento y la frecuencia de uso del motor (AssunMotor, 2022). Los motores BLDC tienen alta eficiencia, alta velocidad y torque como mejores características, durante su operación presentan bajo ruido y larga vida útil (Faturrohman, et al., 2022), la larga vida de un

motor BLDC, puede ser una gran opción para muchas aplicaciones.

Existe un número cada vez mayor de áreas de aplicación y sectores industriales como la industria automotriz, aeroespacial, militar, de petróleo y gas, considerando la temperatura como un factor que influye en la vida útil del motor, se puede observar una tendencia hacia una clasificación de temperatura ambiente de trabajo, de 120°C en adelante para máquinas eléctricas y convertidores electrónicos de potencia (Wrzeczionko, et al., 2015).

El tiempo de vida promedio de un motor BLDC en un sistema de enfriamiento automotriz se muestra en la Tabla 3, algunos fabricantes pueden ofrecer más o menos tiempo de vida, según la aplicación del motor, lugar, altura, condiciones de mantenimiento y manejo.

Tabla 3: Vida útil de un motor BLDC en un sistema de enfriamiento automotriz

Vida útil	15 años
Kilometraje total en su vida útil	350,000
Numero de arranques del motor	36,000 depende de la frecuencia de conmutación
Número de ciclos de temperatura	11,000, corresponde a 2x ciclos por día en 15 años

Aunque una de sus principales características de los motores BLDC es la larga vida útil, debido a las complejas condiciones de funcionamiento y sobrecargas por un mal diseño de un sistema, bloqueos mecánicos u otras causas pueden producirse varias irregularidades. Las fallas más comunes en el motor BLDC están relacionadas con el estator (Shifat & Jang Wook, 2020).

El alto rendimiento del motor BLDC lo han hecho indispensable para aplicaciones de vehículos eléctricos. Sin embargo, el funcionamiento continuo de los motores BLDC en los vehículos eléctricos los hace vulnerables a fallas (Usman & Rajpurohit, 2020).

6. Manufactura del motor BLDC

La manufactura de un motor BLDC también va de la mano con la evolución de los motores, para la tecnología motor integrado ha sido necesario desarrollar o mejorar nuevos procesos para lograr la calidad y cumplir con la seguridad que demanda el producto, dentro de los más importantes están:

6.1. Devanado de agujas

La construcción de las bobinas del estator para el motor BLDC se realiza por medio del proceso de devanado de agujas, donde se coloca alambre magneto sobre el paquete laminado por medio de una aguja como herramienta principal, el acomodo del alambre es por capas de tipo orto-cíclico, lo podemos ver en la Figura 8.

Durante el proceso de bobinado, la aguja debe posicionarse con precisión, aunque una fuerza a través de la tensión del alambre actúa permanentemente sobre la aguja. Al entrar en la

ranura, la orientación de la aguja debe ser precisa para evitar colisiones con la pila del estator (Gerngross, et al., 2017).

El devanado de agujas es un proceso primordial para emplear la tecnología motor integrado, un motor típico basado en PCB es un motor de flujo axial cuyo bobinado del estator está impreso en la PCB (Wang, et al., 2020).

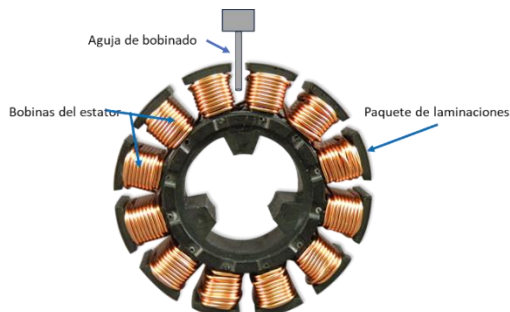


Figura 8: Bobinado de aguja tipo orto-cíclico, (Odawara Automation, 2021)

El bobinado de tipo orto-cíclico nos permite un mejor acomodo de alambre en las ranuras del paquete de laminaciones, incrementa el factor de llenado, reduce de fallas de proceso, otro tipo de bobinado que se clasifica de acuerdo con el acomodo del alambre en las ranuras del paquete es el tipo aleatorio, podemos ver la clasificación de tipos de bobinado en la Figura 9.

El proceso de bobinado de agujas es más lento por el tipo de bobinado que realiza (orto-cíclico), los tiempos de ciclo son más altos, pero se reducen fallas de proceso.

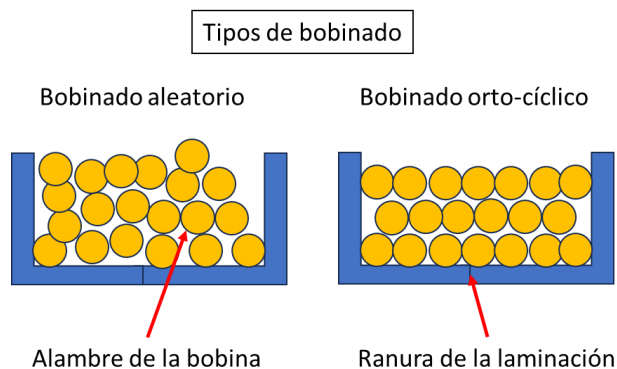


Figura 9: Tipos de bobinado aleatorio y orto-cíclico.

Algunos fabricantes de motores BLDC aún emplean el proceso de bobinado de brazos para la fabricación del estator, la Figura 10 muestra proceso de bobinado de brazos.

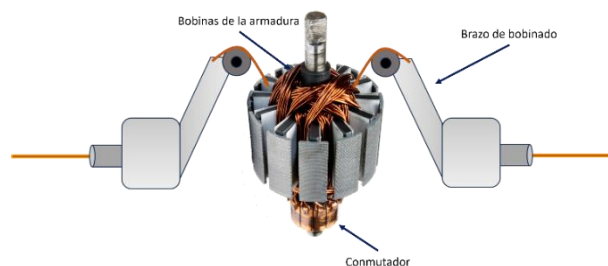


Figura 10: Bobinado de brazos tipo aleatorio.

6.2. Soldadura selectiva

El proceso de soldadura selectiva multi ola, comúnmente se emplea en la unión de elementos electrónicos, ahora se ha desarrollado para la manufactura de motores BLDC con tecnología motor integrado (Motor on board) para sistemas de enfriamiento en automóviles, como se muestra en la Figura 11. El proceso de soldadura selectiva, en la unión de la PCB, con el estator emplea la tecnología a través de orificios (THT por sus siglas en inglés). La tecnología THT es el proceso de montaje de los componentes en una PCB con cables, utilizando los orificios pasantes (Kurtz ursa, s.f.)

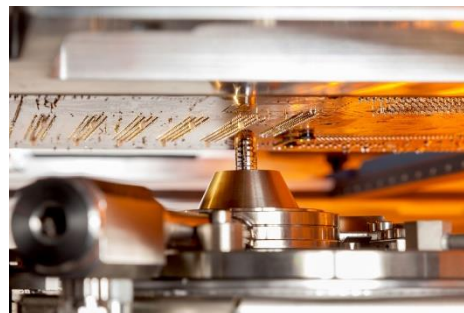


Figura 11: Soldadura selectiva multi ola, (Kurtz ursa, s.f.)

7. Tecnología motor integrado (motor-on-board)

Otra ventaja en la manufactura del motor BLDC es el empleo de la tecnología motor integrado (motor-on-board), donde se integra el motor a la unidad ECU por medio de la PCB, como se muestra en la Figura 12.

La tecnología como la de motor integrado, nos permite cumplir con la calidad de unión de los elementos, empleando procesos donde se asegura la contactación de estos, además de mejorar la seguridad del automóvil. Por medio del proceso de soldadura selectiva se realiza la unión del estator y la PCB donde se encuentra la ECU.

Los nuevos procesos desarrollados para estas tecnologías aseguran la calidad de los motores e incrementan su tiempo de vida. La introducción de características altamente integradas trae consigo nuevos retos que requieren adaptaciones innovadoras de las metodologías de seguridad existentes e incluso algunos conceptos completamente nuevos (Debouk, et al., 2009).

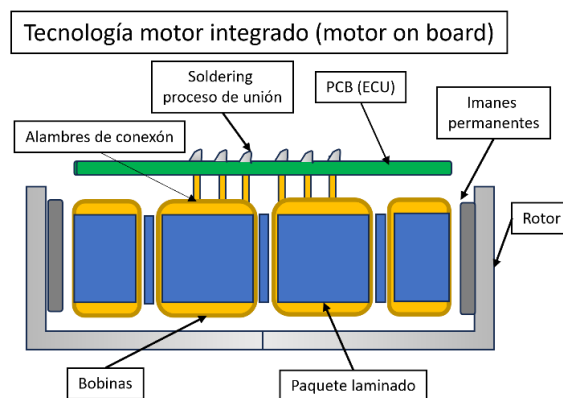


Figura 12: Tecnología motor integrado.

8. Conclusiones

Con el crecimiento de los sistemas electrónicos en los automóviles, se han desarrollado nuevas tecnologías y aplicaciones para asegurar la calidad y seguridad de los componentes, reducir costos en la manufactura, desarrollando nuevos procesos, siguiendo los avances tecnológicos. La implementación del motor BLDC en aplicaciones automotrices nos lleva a las predicciones futuras para el reemplazo de los motores BDC.

Como accionamiento principal, los motores BLDC en sistemas automotrices, han incrementado el tiempo de vida útil, han reducido el ruido y, además de ser compactos, tienen un mejor control por medio de la computadora del automóvil.

Los motores BDC que tienen un tiempo de vida más corto, mayor desgaste y generación de ruido, además sus procesos de manufactura demandan más monitoreo y control.

El puente B6 en los motores BLDC, permite realizar una conmutación electrónica formando una onda alterna controlada por la PWM, la cual es posible regular y controlar. El poco espacio que el puente B6 ocupa dentro del motor nos permite tener sistemas más compactos, a diferencia de los empleados en los motores BDC.

Los motores BLDC cada vez más van ganando interés y atracción para múltiples aplicaciones, continúan las investigaciones para mejorar aún su eficiencia y características, obteniendo más ventajas sobre los motores BDC, algunas de ellas son:

- No tiene un conmutador mecánico ni problemas asociados a este.
- Alta eficiencia debido al uso de un rotor de imán permanente.
- La ausencia de escobillas permite tener altas velocidades de operación incluso con carga y sin carga.
- Las geometrías del motor son más pequeñas comparadas con un motor de escobillas BDC, incluso con un motor de inducción de corriente alterna.
- No requiere mantenimiento ni inspección al sistema de conmutación (conmutador y escobillas).
- Respuesta dinámica debido a la baja inercia (bobinados fijos) del estator.
- Menor interferencia electromagnética (estator fijo)
- Funcionamiento silencioso debido a la ausencia de las escobillas (contacto mecánico con el conmutador).

Algunos estudios realizados y literatura mencionan algunas desventajas sobre los motores BLDC, como son:

- Alto costo de fabricación.
- Requiere de un controlador electrónico.
- No se han desarrollado muchas opciones de control.
- Soluciones de control para motores pequeños
- Requieren de circuitos de accionamiento complejos
- Necesidad de sensores adicionales

Sin embargo, se ha logrado revocar la mayoría de las desventajas debido a los estudios realizados en la actualidad e importancia que se ha dado al motor BLDC, como son:

- Se han desarrollado nuevos procesos de manufactura más eficientes, donde se ha aplicado la mejora continua y optimización de procesos, para reducir costos.

- En aplicaciones automotrices, los motores BLDC tienen una unidad de control ECU, los automóviles tienen una computadora, con la cual se tiene el control de los motores, por lo tanto, no requiere de un control por separado.
- Con los avances se han desarrollado motores BLDC pequeños que caben en la palma de la mano.
- No requiere de sensores adicionales con el sistema de puente B6, algunas aplicaciones emplean el medio puente B3, puede crear una onda alterna y a través de la modulación se tiene un control, no requiere de circuitos complejos.
- La industria automotriz esta migrando a la movilidad más ecológica y menos contaminante, incrementando el interés hacia automóviles híbridos y 100%, eléctricos, cada vez crece de manera exponencial el interés por tener aplicaciones con motores BLDC.

Actualmente, los motores BLDC de tipo rotor de superficie exterior como motores principales, se utilizan ampliamente para aplicaciones comerciales.

En un futuro no muy lejano alrededor del 2030, los motores BDC serán reemplazados casi en su totalidad por los motores BLDC (Deepak, et al., 2022).

Agradecimientos

Se agradece al Tecnológico de Estudios Superiores de Jocotitlán y al Tecnológico de Estudios Superiores de San Felipe del Progreso por el soporte para realizar este artículo.

Referencias

- Ahmed Baba, M., Naoui, M., Cherkaoui, M. (2023). Fault-Tolerant Control strategy for hall sensors in BLDC motor drive for electric vehicle applications. *Sustainability*, 15, 10430. Doi:10.3390/su151310430
- Arrow. (18 de enero de 2016). *arrow.com*. Obtenido de Brushed vs. brushless: What's the difference between these DC motors?: <https://www.arrow.com/en/research-and-events/articles/which-dc-motor-is-best-for-your-application>.
- Asfani, D. A., Negara, I. M., Hernanda, I. G., Fahmi, D., Sihombing, M. C., Dewi, P. M. (2021). BLDC performance analysis due to stator winding unbalance. 2021 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA), IEEE. Doi:10.1109/isitia52817.2021.9502259
- AssunMotor. (22 de noviembre de 2022). How long do DC brushless motors last?. Obtenido de Assun Motor Pte Ltd: <https://assunmotor.com/blog/how-long-do-brushless-motors-last/>
- Brandtner Hafner, H. (2019). Assessing the natural-healing behavior of adhesively bonded structures under dynamic loading. *Engineering Structures*, 196. Doi:10.1016/j.engstruct.2019.109303
- Cavagnino, A., Saied, S., Vaschetto, S. (Jan-Feb de 2014). Experimental Identification and reduction of acoustic noise in small brushed DC motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 50, 317-326. Doi:10.1109/TIA.2013.2271215
- Chun, T. W., Tran, Q. V., Lee, H. H., Kim, H. G. (2014). Sensorless control of BLDC motor drive for an automotive fuel pump using a hysteresis comparator. *IEEE transactions on power electronics*, 29, 1382-1391. Doi:10.1109/tpe1.2013.2261554
- Debouk, R., Czerny, B., D'Ambrosio, J., Joyce, J. (2009). Safety Analysis of Software-intensive motion control systems. *SAE International Journal of Passenger Cars-electronic and Electrical Systems*, 2, 281-286. Doi:10.4271/2009-01-0756
- Deepak, M., Aruldavid, R., Rajesh, V., Sathiyasekar, K., Barnawi, A., Bharatiraja, C., Mihet Popa, L. (2022). A review of BLDC motor: State of

- art, advanced control techniques, and applications. *IEEE Acces*, 10, 54833-54869.
Doi:10.1109/ACCESS.2022.3175011
- Faturrohman, R., Ismail, N., Effendi, M. R. (2022). Speed control system of BLDC motor based on DSP TMS320F28027F. 2022 16th International Conference on Telecommunication Systems, Services, and Applications (TSSA). IEEE.
Doi:10.1109/tssa56819.2022.10063899
- Gerngross, M., Herrmann, P., Westermaier, C., Endisch, C. (2017). Highly flexible needle winding kinematics for traction stators based on a standard industrial robot. 2017 7th International Electric Drives Production Conference, IEEE, 1-7. Würzburg, Germany.
Doi:10.1109/EDPC.2017.8328147
- Hoe Cheon, K., Tae Uk, J. (2012). Analysis of rotor overhang effect considering load torque variance in automobile BLDC fan motor, *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 68-71. Seoul, Korea South.
Doi:10.1109/VPPC.2012.6422571
- Irasari, P., Widiyanto, P., Muqorobin, A., Hikmawan, M. F. (2023). Feasibility analysis of the conversion of brushed to brushless direct current motor. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 13, 218.
Doi:10.11591/ijece.v13i1.pp218-228
- Irimia, N. D., Lazar, F. I., Luchian, M. (2019). Comparison between sinusoidal and space vector modulation techniques on the resulting electromagnetic torque ripple produced by a three-phase motor under field-oriented control. 2019 6th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT), IEEE, 640-645. Paris, Francia.
Doi:10.1109/CoDIT.2019.8820718
- Jank Wook, H., Shifat, T. A. (2020). Remaining useful life estimation of BLDC motor considering voltage degradation and attention-based neural network. *IEEE Acces*, 8.
Doi:10.1109/ACCESS.2020.3023335
- Janpan, I., Chaisricharoen, R., Boonyanant, P. (2012). Control of the brushless DC motor in combine mode. *Procedia Engineering*, 32, 279-285.
Doi:10.1016/j.proeng.2012.01.1268
- Jin, H., Liu, G., Li, H., Chen, B., Zhang, H. (2022). A fast commutation error correction method for sensorless BLDC motor considering rapidly varying rotor speed. *IEEE transactions on industrial electronics* (1982), 69, 3938-3947.
Doi:10.1109/tie.2021.3070493
- Kurtz ersa. (s.f.). A class of its own - today and tomorrow. Obtenido de kurtz ersa: <https://kurtzrsa.com.cn/en/technology/selective-soldering/>
- Kurtz ersa. (s.f.). Wave soldering the perfect wave. (kurtz ersa) Recuperado en septiembre de 2023, de kurtz ersa. <https://www.kurtzrsa.com/technology/wave-soldering>
- Jisha, L. K., Vishnu, V., Divya, Y. S., Rakesh, G., Baba, D. B., Harshavardhan, D. (2022). Study on fuzzy logic controller and PID controller for speed control of BLDC motor. *International Conference on Trends in Chemical Engineering 2021 (ICoTRiCE2021)*.
- Kim, H., Kim, J., Han, K., Won, D. (2022). 1D Modeling considering noise and vibration of vehicle window brushed DC motor. *Applied Sciences*, 12.
Doi:10.3390/app122211405
- Larminie, J., Lowry, J. (2012). *Electric vehicle technology explained: second edition*. Vol. II. Wiley, (Ed.) Nashville, TN, USA: John Wiley & Sons Ltd.
Doi:10.1002/9781118361146
- Lee, T. Y., Seo, M. K., Kim, Y. J., Jung, S. Y. (2016). Motor design and characteristics comparison of outer-rotor-type BLDC motor and BLAC motor based on numerical analysis. *IEEE transactions on applied superconductivity: a publication of the IEEE Superconductivity Committee*, 26, 1-6.
Doi:10.1109/tasc.2016.2548079
- Lu, M., y Li, Y. (2010). New design for sensorless BLDC motor using half-bridge driver circuit. 2010 International Conference on E-product E-service and E-entertainment. IEEE, 1-4. Henan, China.
Doi:10.1109/ICEEE.2010.5661498
- Mousmi, A., Abbou, A., El Houm, Y. (19-20 de April de 2017). Trapezoidal control of brushless DC motor based on DSP F28335. 2017 International Conference on Wireless Technologies, Embedded and Intelligent Systems (WITS). IEEE, 1-5. Fez, Morocco.
Doi:10.1109/WITS.2017.7934602
- Odawara Automataion. (2021). Needle winding. Obtenido de OA Odawara automataion, Inc.: <https://odawara.com/winding-solutions/needle-winding/>
- Qian, W., Zhang, H. (2017). A sensorless control solution for DCT oil pump with BLDC motor, WCX™ 17: SAE World Congress Experience. SAE Internacional, 8.
Doi:10.4271/2017-01-1631
- Rahmani, O., Itarabian, M., Sadrossadat, S. A. (2018). Modeling and simulation of speed and efficiency of BLDC motor as a starter motor based on multilayer perceptron (MLP) neural network. *International Transportation Electrification Conference & EXPO Asia-Pacific*. IEEE, 1-5. Bangkok, Thailand.
Doi:10.1109/ITEC-AP.2018.8433299
- Rangappla, V. (2022). Motor control development use cases - Electronic power steering. Recuperado el 2023, de Linked In: <https://www.linkedin.com/pulse/motor-control-development-use-cases-electronic-power-rangappla>
- Robert Bosch GmbH. (2019). Motores CC. Obtenido de Bosch I-Business - impulsado por las ideas: <https://www.bosch-mobility.com/en/solutions/electric-motors/ec-motors-for-electric-cooling-fans/>
- Sahana, K. M., Keerthi, T. G., Gouthami, Y., Anush, B. N., Hooli Shwetha, S., Vadde, A., Meghana, T. V. (2023). Design, modelling and parametric analysis of a BLDC motor in E-bike to predict torque range. *Russian electrical engineering*, 94, 129-137. Doi:10.3103/s1068371223020098
- Seidel, R., Kästle, C., Ockel, M., y Franke, J. (2022). Impact of THT-hole dimensioning on manufacturability in selective wave soldering. *Microelectronics and reliability*, 137.
Doi:10.1016/j.microrel.2022.114773
- Shifat, T. A., Jang Wook, H. (2020). Remaining useful life estimation of BLDC motor considering voltage degradation and attention-based neural network. *IEEE*, 8, 168414 - 168428.
Doi:10.1109/ACCESS.2020.3023335
- Shigemori, T., Sawa, K. (2004). Characteristics of carbon and copper flat commutator on DC motor for automotive fuel pump. *Proceedings of the 50th IEEE Holm Conference on Electrical contacts and the 22nd International Conference on Electrical contacts 2004*, IEEE, 523-527. Seattle, WA, USA.
Doi:10.1109/HOLM.2004.1353166
- Usman, A., Rajpurohit, B. S. (2020). Time-efficient fault diagnosis of a BLDC motor drive deployed in electric vehicle applications. 2020 *IEEE Global Humanitarian Technology Conference (GHTC)*, IEEE, 1-5. Seattle, WA, USA.
Doi:10.1109/GHTC46280.2020.9342941.
- Vidlak, M., Gorel, L., Makys, P., Stano, M. (2021). Sensorless speed control of brushed DC motor based at new current ripple component signal processing. *Energies*, 14.
Doi:10.3390/en14175359
- Wang, H., Cui, J., Zhang, Z., Ma, C., Li, H. (2020). PCB-based brushless DC motor for motor-on-board sensor systems. 2020 *IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (ITS)*, 709-713. Chicago, IL, USA: IEEE.
Doi:10.1109/ITEC48692.2020.9161743
- Wong, V. (2023). Future of BLDC motor controller. Recuperado el 2023, de Linked In: https://www.linkedin.com/pulse/future-blcd-motor-controller-vincent-wong-edkqe?trk=articles_directory
- Wrzecionko, B., Looser, A., W. Kolar, J., Casey, M. (2015). High-temperature (250 °C / 500 °F) 19 000 min-1 BLDC fan for forced air-cooling of advanced automotive power electronics. *ASME Transactions on mechatronics*, 20, 37-49.
Doi:10.1109/TMECH.2014.2309481
- Zhao, J., Yangwei, Y. (2011). Brushless DC motor fundamentals application Note. MPS. Obtenido de https://media.monolithicpower.cn/document/Brushless_DC_Motor_Fundamentals.pdf