

# Caracterización de un motor Brushless comparado con motor DC sin carga

*Characterization of a Brushless motor compared to a no-load DC motor*

José Enrique Salcedo



**Cómo citar:** Salcedo, J. E. (2021). Caracterización de un motor Brushless comparado con motor DC sin carga. *Hashtag*, (18), 54-68



Recibido: 19 - 10 - 2020 / Aceptado: 12 - 11 - 2020 / Publicado: 12 - 07 - 2021

## Resumen

Este trabajo presenta las principales características de funcionamiento de un motor Brushless A2212/13t sin carga, comparado con el funcionamiento de un motor tradicional DC, con el fin de demostrar las ventajas que tienen los motores sin escobillas (BLDC) frente a los motores DC convencionales. Si bien se trabaja con una referencia específica de un motor sin escobillas, los resultados se pueden extrapolar de forma general ya que los principios de funcionamiento son iguales, tanto en motores DC como en BLDC. Al final del documento, se evalúa el desempeño de los motores descritos, teniendo en cuenta el voltaje y la corriente requerida para estabilizar cada uno de los motores sin carga, con el fin de probar la eficiencia de los motores sin escobillas e incentivar su implementación en proyectos futuros.

Se experimenta con una señal PWM que se envía a la tarjeta controladora ESC, variando el ancho de pulso del ciclo útil para generar un cambio de la velocidad del motor y establecer la relación entre el ancho de pulso y la corriente en un motor sin escobillas y sin carga.

## Palabras claves:

A2212/13t, BLDC, motores Brushless vs motores DC, motores sin escobillas

## Abstract

This paper specifically presents the main operating characteristics of a Brushless A2212/13t motor, compared with the power consumption of a traditional DC motor in order to demonstrate the advantages of Brushless motors (BLDC) over conventional DC motors, although it works with a specific reference of a Brushless motor, the results can be extrapolated in general since the principles of operation are the same in both DC and BLDC motors. At the end of the document the performance of the motors described is evaluated taking into account the voltage, current and power required to stabilize each of the motors without load in order to demonstrate the efficiency of Brushless motors and encourage their implementation in future projects.

A PWM signal is experimented with and sent to the ESC controller board by varying the pulse width of the useful cycle to generate a change in motor speed and establish the relationship between pulse width and current in an unloaded brushless motor.

## Keywords:

A2212/13t, BLDC, Brushless motors, Brushless vs DC motors

## Introducción

Los motores DC no son los más eficientes que existen en el mercado, si bien son los más fáciles de controlar tienen muchas pérdidas de energía y los convierte en una máquina de baja eficiencia, sigue siendo uno de los sistemas dinámicos más utilizados en la prueba de algoritmos de control, debido a que su función de transferencia puede ser reducida a un sistema lineal de orden dos; por esto, se ha convertido en el ejemplo obligado en los textos de control clásicos. Además, es un dispositivo económico, tanto así que es popular en la generación de movimiento, rotacional o lineal; también en procesos más complejos, como en la robótica, la aviónica y la automatización de procesos en general, entre otros.

La electrónica es una de las áreas con mayor desarrollo tecnológicos en las últimas cinco décadas y en la parte rotacional se han desarrollado motores con mayor precisión como los motores paso a paso, con mayor torque como los motorreductores, o con mayor velocidad como los motores sin escobillas y me centro en este último por las características que poseen ya que no solo es velocidad sino que tienen gran potencia, momento de fuerza (torque) y precisión si se acompaña de los circuitos adecuados, además se comparan las características fundamentales que tienen los motores de corriente directa (DC) y los motores de corriente directa sin escobillas (BLDC).

La principal característica de los motores BLDC es que no emplean escobillas en la conmutación para la transferencia de energía, ya que estas producen rozamiento, disminuyen el rendimiento, generan calor, son ruidosos y demandan una sustitución periódica y, por tanto, un mayor mantenimiento. Conseguir que un motor sin escobillas sea estable parece un proyecto sencillo, pero realmente es complejo porque se requiere que la velocidad del rotor sea estable, sin importar las condiciones externas a las que sea sometido. En este escenario es donde se utiliza un Controlador Electrónico de Velocidad (ESC), que “tiene como finalidad lograr una velocidad estable en el rotor, sin importar la carga o las perturbaciones que tenga. En general, una hélice se considera una carga con un conjunto de perturbaciones dinámicas; lo cual hace de este un problema de control complejo” (Cotte y Moreno, 2010).

Para encontrar diferencias específicas en la eficiencia y la potencia de un motor DC y un motor sin escobillas se muestran los resultados de una serie de pruebas realizadas con un motor DC de 12 voltios y un motor BLCD (sin escobillas). Para ello, empezaremos con el modelo básico y el montaje realizado para realizar las medidas; se debe tener en cuenta que para motores sin escobillas es necesario usar un circuito que controle la velocidad del motor y, al mismo tiempo, administre la energía requerida. Este circuito es conocido como *esc*, y debe estar acompañado de un circuito básico que genere una señal PWM con la cual se define la velocidad del motor; en cambio, para las pruebas del motor DC se requiere básicamente un circuito de protección para los equipos y un variador de voltaje que provoca el cambio de velocidad. Así pues, en la segunda parte se evaluarán los resultados obtenidos y, por último, se analizarán los pros y los contras obtenido con base a los experimentos desarrollados.

## Principios de funcionamiento de un motor Brushless

El principio de funcionamiento de un motor sin escobillas se asemeja bastante al desarrollo de un motor AC o un motor paso a paso, el motor se compone de tres elementos principales, que son: el estator, el rotor, y el sensor de efecto hall.

### El estator del motor BLDC

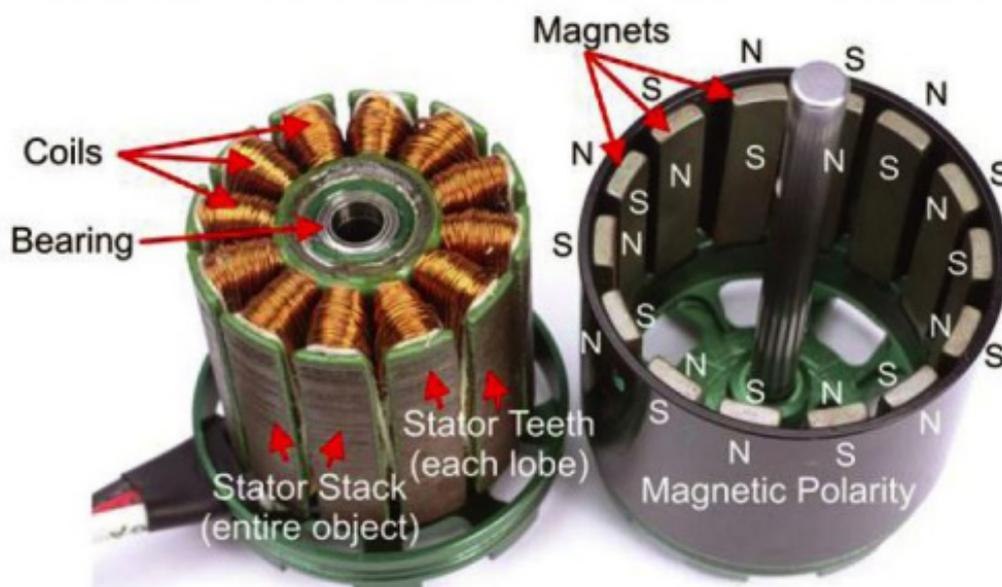
Está constituido por un conjunto de láminas de acero apiladas con bobinados insertados en las ranuras de forma axial y a lo largo de la periferia interna. Generalmente, se asemeja a un motor de inducción, pero las bobinas se distribuyen de una forma diferente; una o más bobinas colocadas en las ranuras se interconectan formando las fases, cada una de estas se distribuyen en la periferia del estator para formar un número par de polos.

Existen dos tipos de bobinaos del estator, a saber, la trapezoidal y la sinusoidal. La principal diferencia entre ambas es la forma de la interconexión de las espiras en los bobinados del estator, que implican dos tipos de fuerza contraelectromotriz (f.c.e.m). Dichas fuerzas generan, simultáneamente, corrientes que tienen variaciones trapezoidales o sinusoidales; estos últimos son más suaves que los motores trapezoidales. No obstante, los motores sinusoidales requieren mayor cantidad de cobre para interconectar los diferentes bobinados; esto genera mayor costo en su fabricación y asimismo, aumenta su peso y su tamaño. Por consiguiente, los motores Brushless están constituidos por bobinados de tipo trapezoidal.

### El rotor

Está construido por imanes permanentes y puede variar desde dos hasta ocho pares de polos alternativos de norte (N) y sur (S). Existen diferentes materiales magnéticos para fabricar el rotor y debe escogerse el más adecuado. Por lo general, se usa ferrita por costos, pero los rotores compuestos por dicho material tienen una desventaja, ya que presentan una baja densidad de flujo. Para motores de alta eficiencia se suelen utilizar materiales de aleación de alta densidad magnética porque permiten reducir el volumen, mejorando la relación tamaño/peso; estas aleaciones se caracterizan por tener un campo magnético permanente y, habitualmente, se utiliza Neodimio, Samario-cobalto, Ferrita-boro, entre otros.

Figura 1. Estator y rotor de un motor BLCD



Fuente: Morales, J. (2018)

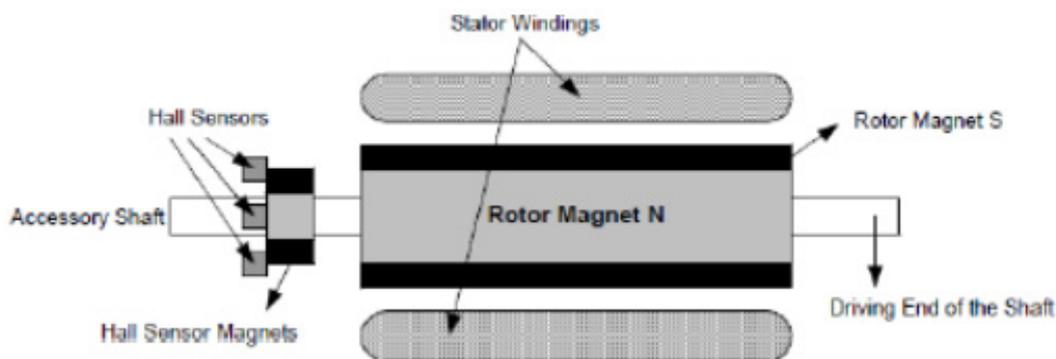
## Sensor Hall

A diferencia de un motor de corriente continua, la conmutación de un motor BLCD se realiza de forma electrónica, pero en pro de poder provocar el giro del motor los bobinados del estator deben activarse de forma secuencial; para realizar dicha acción es necesario conocer la posición exacta del rotor y, de cara a eso, se usan sensores de efecto Hall, que están integrados en el estator, como característica única de los motores Brushless.

Cuando por un conductor atraviesa una corriente eléctrica, se genera en este un campo magnético que forma una fuerza transversal en los portadores de la carga en movimiento y tiende a empujar a un lado del conductor una acumulación de la carga. En esa medida, a los lados del conductor se equilibra el campo magnético, produciendo una diferencia de potencial. Esta diferencia de potencia transversal medible se conoce como “Efecto Hall” y fue descubierta por Edwin Herbert Hall en el año 1879.

En su gran mayoría, los motores BLDC tienen tres sensores de Efecto Hall integrados en el estator al extremo opuesto al rotor del motor; cada vez que los polos magnéticos pasan cerca a los sensores Hall aparece una señal de alto o bajo, las cuales señalan si el polo norte o el polo sur están pasando cerca al sensor. De acuerdo con estos estímulos se determina la secuencia exacta para la conmutación.

**Figura 2.** Posicionamiento de sensores Hall en un motor sin escobillas



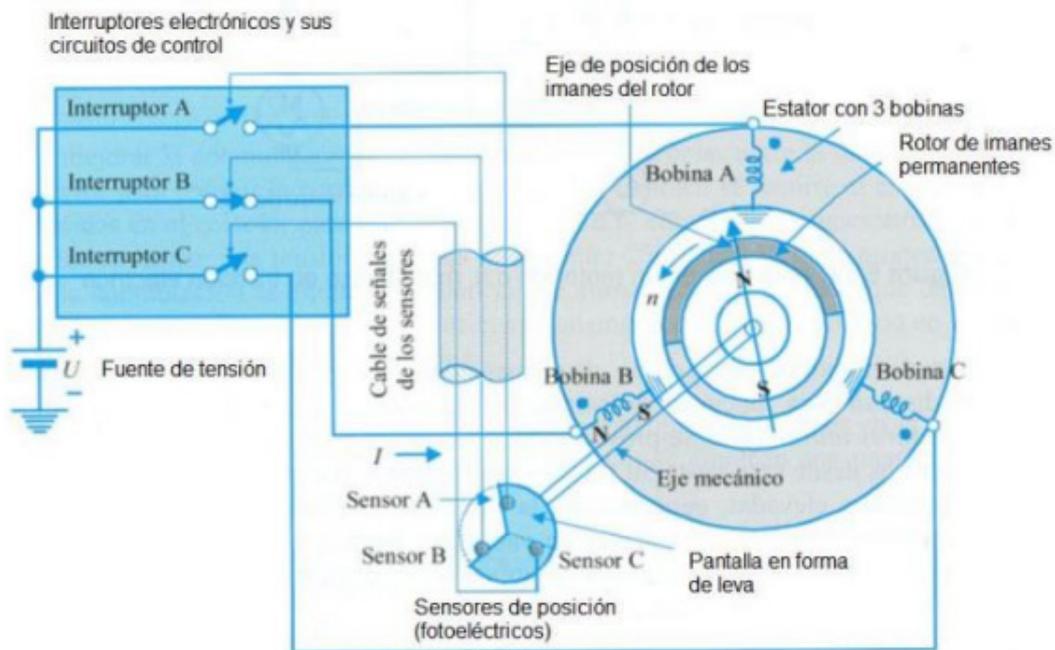
**Fuente:** Texas Instruments, 2021

Los sensores Hall requieren de una fuente de alimentación que puede estar entre los 4 a los 24 voltios, con un consumo de corriente desde los 5 hasta los 15 miliamperios. En procura de un diseño externo se deben tener en cuenta las especificaciones del motor si lo que se quiere es suministrar el voltaje y la corriente necesarios para su funcionamiento.

Generar el giro en el motor requiere que a cada secuencia de conmutación le corresponda un estado de activación de las bobinas, de tal forma que cuando uno de los devanados tenga una tensión de alimentación positiva (cuando la corriente entra y circula por el devanado). Un segundo devanado tiene una tensión de alimentación negativa (salida de la corriente de la bobina) y el tercero se encuentra sin corriente, después se intercambia sucesivamente la alimentación en las bobinas de forma secuencial, de manera que la bobina por la que entraba corriente ahora no tenga alimentación; la que tenía la salida

de la corriente tenga la entrada (voltaje positivo) y la que estaba des-energizada se quede con la corriente de salida (voltaje negativo). Así, secuencialmente, se intercambia la alimentación de las bobinas a una velocidad medible en milésimas de segundo.

**Figura 3.** Secuencia de funcionamiento de un motor BLDC



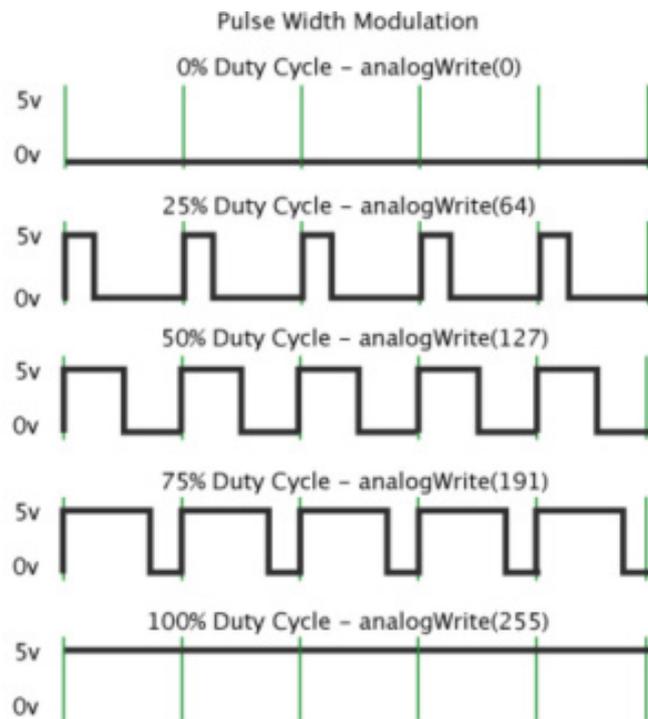
**Fuente:** Delgado, 2013

El par motor se produce debido a la interacción entre el campo magnético generado por las bobinas del estator y los imanes permanentes. Idealmente, el par máximo se produce cuando estos dos campos se encuentran a  $90^\circ$  uno del otro y decae a cero, cuando ambos campos magnéticos se mueven juntos. A fin de mantener el motor en marcha, el campo magnético producido por las bobinas debe cambiar de posición (debe cambiar la activación y desactivación de las bobinas), de tal forma que varíe, según el movimiento del campo magnético del rotor, lo cual actualiza el campo magnético del estator (Morales, 2018). De esta forma se genera la fuerza para que el rotor gire sobre su eje y pueda alcanzar velocidades tan grandes.

### **Modulación PWM**

También conocida como Pulse Width Modulation, o modulación por ancho de pulso. Consiste en una señal cuya frecuencia es fija con dos valores de tensión, uno alto y otro bajo; se caracteriza también por un ciclo útil que hace referencia al porcentaje de tiempo esta activo durante un ciclo.

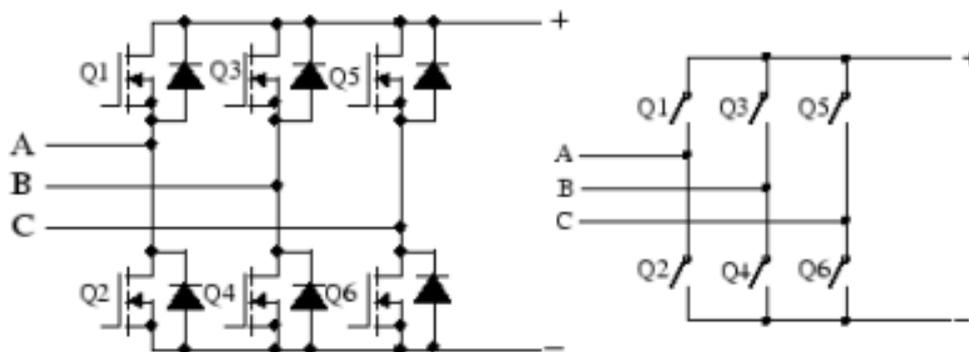
**Figura 4.** Ciclos de trabajo de un PWM



**Fuente:** modificado a partir de Rufian (2016)

La forma de transmitir la información desde PWM al motor se da por medio de una tarjeta controladora, también conocida como ESC (Electronic Speed Controller) o inversor trifásico compuesto principalmente de un puente H, construido a partir de transistores MOSFET como se muestra a continuación:

**Esquema 1.** Configuración principal de un puente H para motores sin escobillas

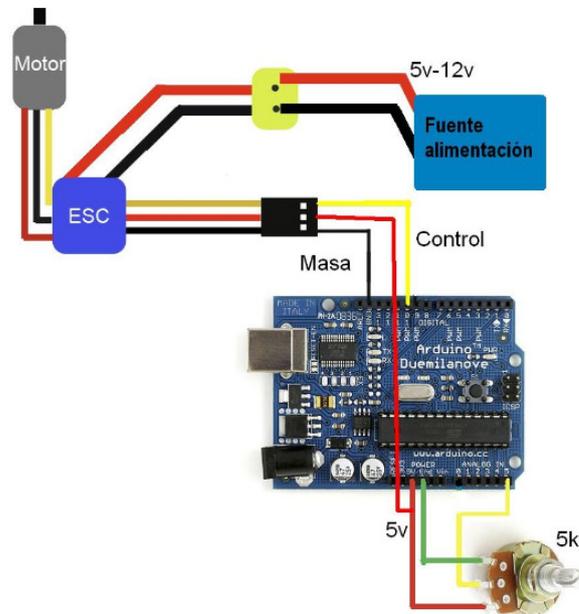


**Fuente:** MathWorks (s.f.)

## Pruebas motor Brushless

En este escenario se usó un motor Brushless de referencia A2212/13t de 1000 kv (1000 revoluciones por minuto por cada voltio aplicado); un controlador de velocidad ESC 30a; un Arduino uno y un potenciómetro de 50 KΩ. Además de una fuente de alimentación con capacidad de corriente mayor a 3 Amperios, en este caso, una fuente DC de alta potencia.

Figura 5. Diagrama de conexiones



Fuente: elaboración propia

Tabla 1. Datos del motor sin escobillas referencia A2212/13t

No. of Cells:	2 - 3 Li-Poly 6 - 10 NiCd/NiMH
Kv:	1000 RPM/V
Max Efficiency:	80%
Max Efficiency Current:	4 - 10A (>75%)
No Load Current:	0.5A @10V
Resistance:	0.090 ohms
Max Current:	13A for 60S
Max Watts:	150W
Weight:	52.7 g / 1.86 oz
Size:	28 mm dia x 28 mm bell length

Fuente: página del fabricante, 2019\_\_\_\_\_

## Funcionamiento

La fuente de alimentación se programa para que entregue 12 voltios a un máximo de 3 amperios al circuito ESC 30a, y está diseñado para recibir una referencia de velocidad generada por una señal PWM, al mismo tiempo que es alimentado por un voltaje directo con capacidad de entregar corrientes muy altas. Adicionalmente, tiene un regulador de voltaje que, aparte de entregar la potencia necesaria al motor, también entrega una salida estable de 5 V para alimentar otros circuitos. Con eso es posible alimentar un sistema que entrega la señal PWM, que es generada por un Arduino y un potenciómetro que permite variar la velocidad; el Arduino tiene esta programación:

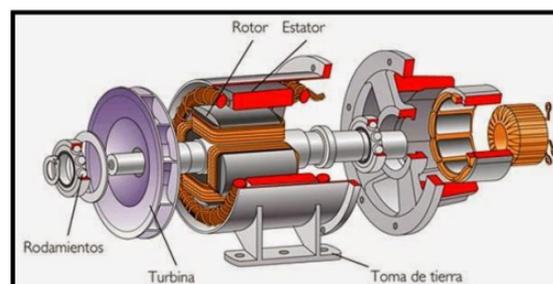
```
#include <Servo.h>
Servo esc;
void setup() {
  esc.attach(6);
  esc.writeMicroseconds(1000);
  Serial.begin(9600);
}
void loop() {
  int val;
  val= analogRead(A0);
  val= map(val, 0, 1023,1000,2000);
  esc.writeMicroseconds(val);
}
```

En ese orden, para la toma de datos se utiliza una fuente de poder programable Keithley 2231 A, que entrega un potencial de 12 Voltios y una corriente máxima de 3 Amperios. Así, se tienen en cuenta las especificaciones de la hoja de datos del motor A2212/13t que, sin carga y a la máxima potencia, genera un consumo de corriente menor a 2 A, para proteger la fuente de alimentación.

## Motor DC

El motor de corriente continua es una máquina que convierte la energía eléctrica en un movimiento o trabajo mecánico. También puede servir como generador o motor, por medio de las fuerzas de atracción y repulsión que existen entre los polos que forman el campo magnético

**Figura 11.** Componentes de un motor de corriente continua



Fuente: Pololu, 2020

En los motores DC la velocidad del motor depende del voltaje suministrado (en su configuración más sencilla). En este caso, se usó el motor de corriente directa marca POLOLU, modelo No. 2827

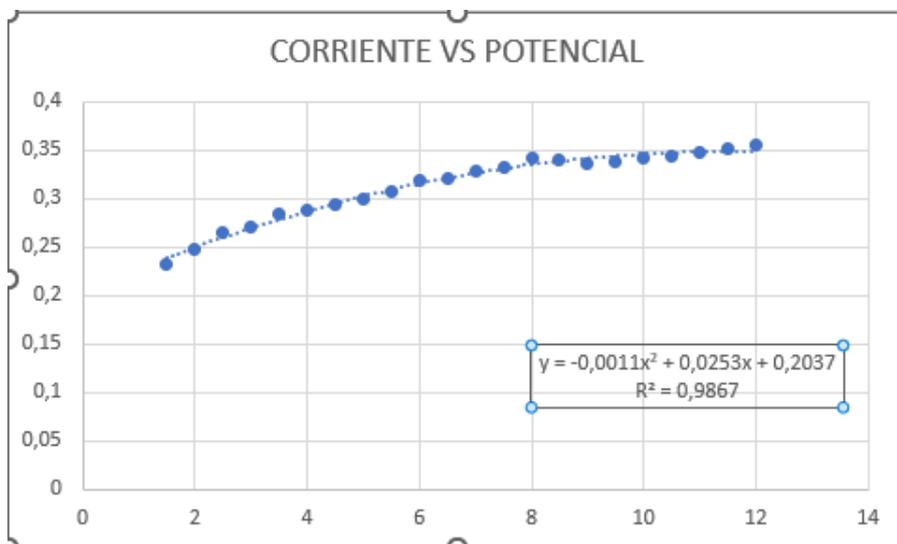
**Tabla 2.** Hoja de datos del motor de DC

Relación reductora:	131:1
Velocidad sin carga @ 6V:	40 rpm
Corriente sin carga @ 6V:	250 mA
Corriente de traba @ 6V:	2500 mA
Par de torsión @ 6V:	125 oz·in
Velocidad sin carga @ 12V:	80 rpm
Corriente sin carga @ 12V:	300 mA
Corriente de traba @ 12V:	5000 mA
Par de torsión @ 12V:	250 oz·in
Longitud de cable:	11 in

Fuente: página del fabricante, 2020

Se realizaron mediciones de corriente variando el voltaje, desde un voltio hasta 12 voltios con intervalos de 0,5 V en el motor sin carga, obtviéndose la siguiente curva

**Figura 12.** Curva de corriente vs voltaje aplicado en el motor DC



Fuente: elaboración propia

Se obtiene la ecuación

$$y = -0,0011x^2 + 0,0253x + 0,2037$$

con  $R^2 = 0,9867$

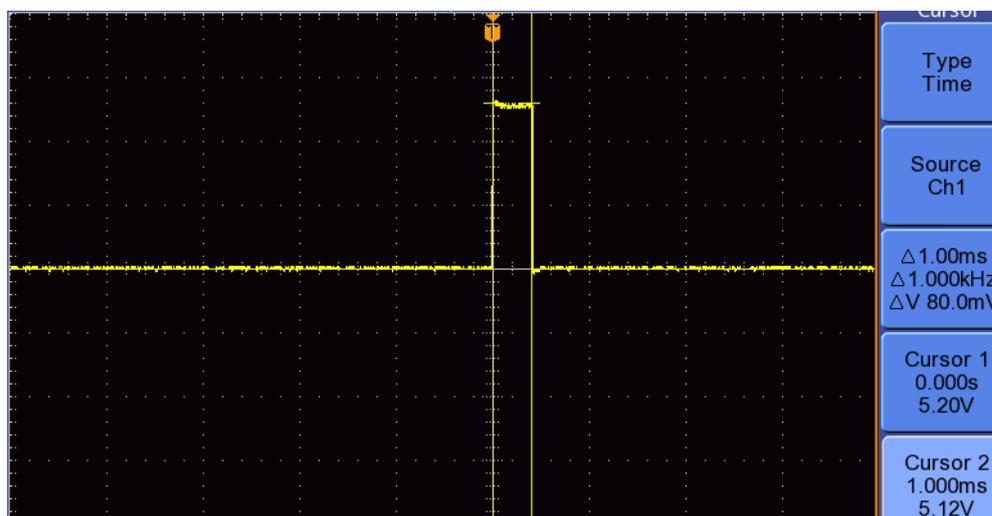
De la gráfica anterior se puede observar que el consumo de corriente es parecido a una relación lineal con el potencial aplicado al motor, sin embargo, las bobinas internas hacen que esta relación no sea completamente lineal, por lo que la mejor representación matemática de los datos es una potencia de orden 3.

## Resultados

Llama la atención observar cómo varía la intensidad de la corriente en el circuito a medida que el ancho de pulso se hace mayor sin variar el voltaje en la fuente, es el principio de funcionamiento de los sistemas basados en PWM, y de la misma forma, se tienen resultados muy aceptables en cuanto a la señal entregada por el circuito ESC, ya que genera señales “limpias”, aun cuando se tiene ruido en la entrada; esto permite deducir que el sistema de funcionamiento con motores Brushless es altamente confiable. Otra característica que se logra evidenciar es la respuesta inmediata del motor sin escobillas frente a la variación de la señal PWM; esto se logra gracias a que la potencia que se requiere para generar los cambios de velocidad en el motor están “disponibles de forma inmediata”, ya que el circuito ESC es muy eficiente en la conmutación sin que haya pérdidas de tiempos de subida y de bajada (en el sentido de que solo se modifica el ancho de pulso). Adicionalmente, al no tener escobillas el motor, tampoco provoca una fricción interna y esto reduce el tiempo de respuesta, el ruido y el desgaste interno del motor.

Inicialmente, no se gira la perilla del potenciómetro, sin embargo, se genera un pequeño pulso de 1 milisegundo que se conoce como “ancho de pulso base”, ya que en este momento no gira el motor y, para entonces, el consumo de corriente por todo el sistema es de 45 miliamperios

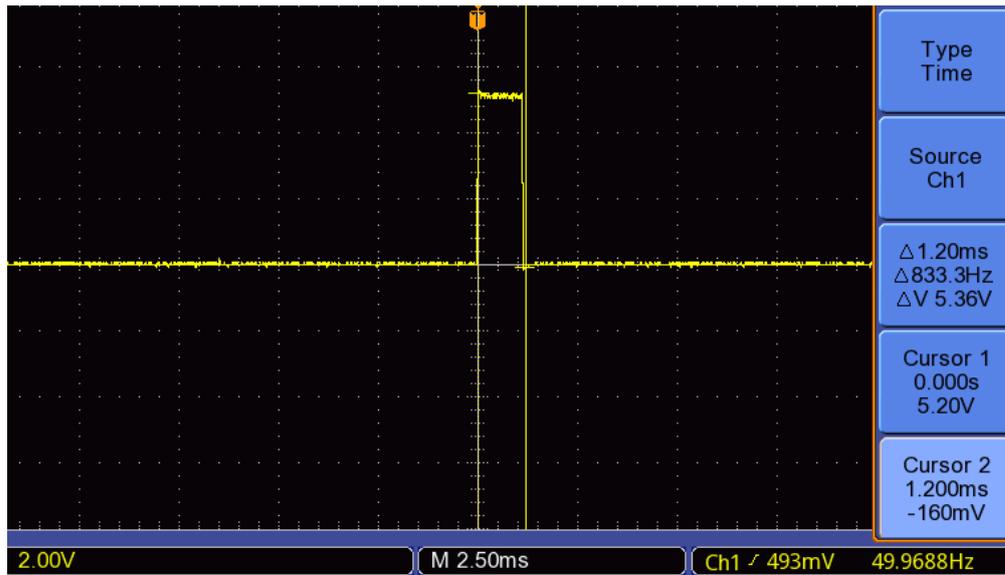
**Figura 6.** Ancho de pulso base (sin accionar el motor)



Fuente: elaboración propia

A medida que se gira la perilla el pulso se ensancha hasta que inicia el motor; en ese momento la corriente empieza a elevarse y, para cuando la corriente tiene un valor de 110 miliamperios, el motor gira y el ancho de pulso es de 1,2 milisegundos

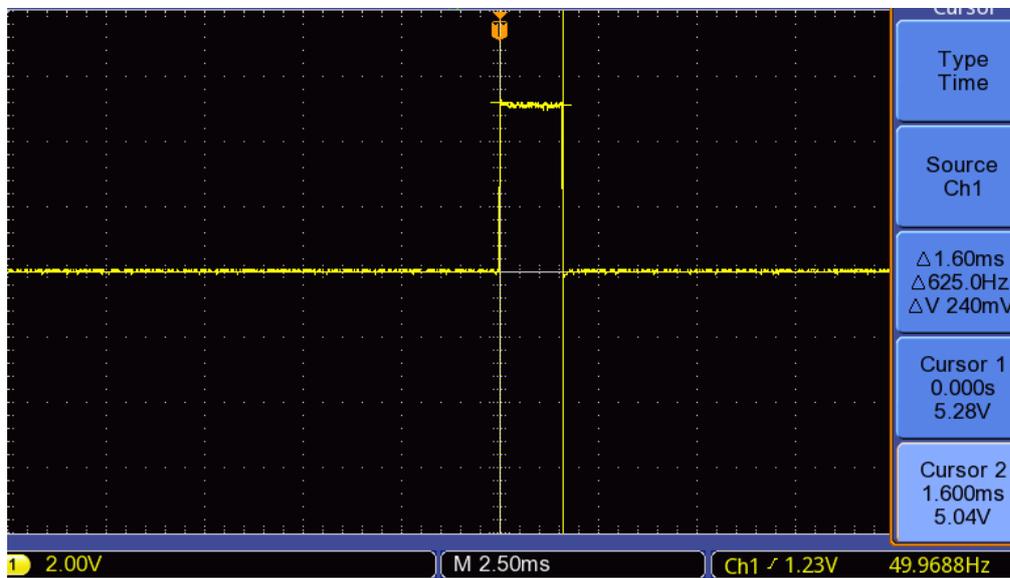
**Figura 7.** Ancho de pulso mínimo (motor al mínimo de revoluciones)



Fuente: elaboración propia

Al girar la perilla más hacia la derecha aumentan las revoluciones del motor considerablemente, alcanzándose un valor medio de 1,5 milisegundos y una corriente de 410 miliamperios

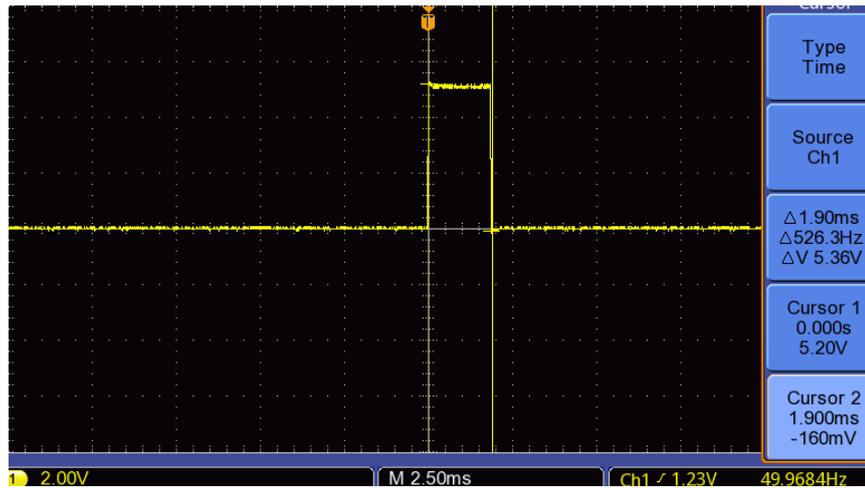
**Figura 8.** Ancho de pulso medio (motor a la mitad de las revoluciones)



Fuente: elaboración propia

Al girar la perilla hasta el extremo derecho se obtiene el máximo de revoluciones que el motor puede generar en estas condiciones, con un ancho de pulso de 1,9 milisegundos y una corriente de 692 miliamperios

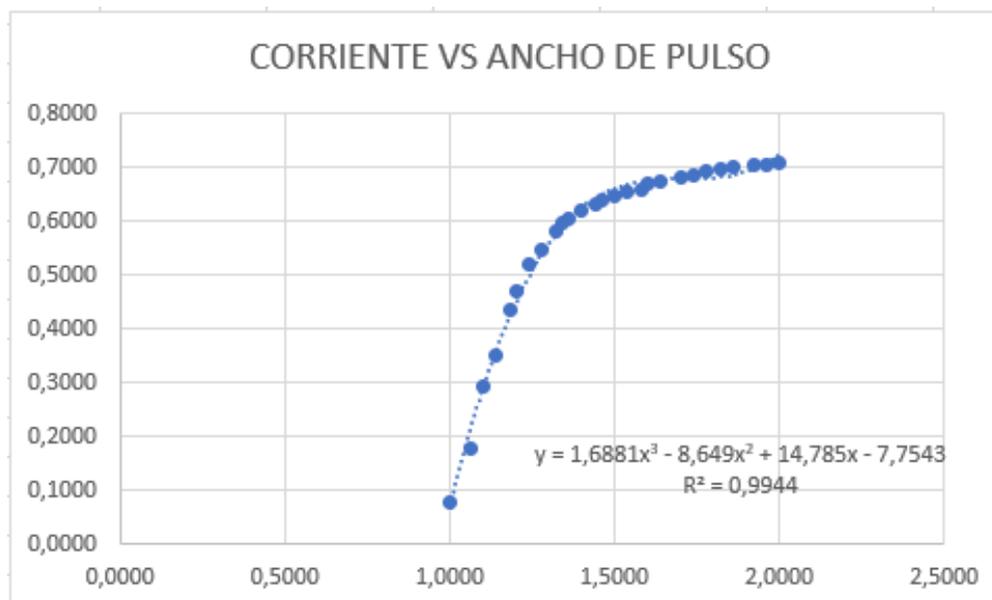
Figura 9. Ancho de pulso máximo (motor al máximo de revoluciones)



Fuente: elaboración propia

Al visualizar las figuras anteriores, cabe resaltar que el potencial es el mismo y se registra un valor de 5,2 voltios; que las variaciones pequeñas de voltaje se deben al ruido generado por el potenciómetro en conjunto con el Arduino. Finalmente, se hicieron mediciones para encontrar una relación entre el ancho de pulso y la corriente entregada por la fuente (con la cual cambia la velocidad del motor). A partir de eso, se obtuvo la siguiente curva polinómica de la cual se puede inferir –como lo estipula el fabricante del motor en la hoja de datos– una zona de trabajo que se encuentra entre el 40 % y el 90 % del ciclo útil del PWM, a una frecuencia fija de 50 Hz

Figura 10. Ancho de pulso vs corriente en el motor Brushless



Fuente: elaboración propia

Con la gráfica anterior se obtiene la ecuación:

$$Y = 1,6881x^3 - 8,649x^2 + 14,785x - 7,7543$$

la cual tiene una regresión lineal con un  $R^2 = 0,99$

De acuerdo con este comportamiento se puede deducir que en el motor sin escobillas el ancho de pulso determina la cantidad de corriente que consumen los bobinados, y la relación entre el ancho de pulso y la corriente no es lineal sino exponencial de orden tres. Se evidencia, también, que al iniciar con una variación muy pequeña en el ancho de pulso (entre 1 y 1,3 milisegundos) el motor tiene un consumo considerable de corriente (de 100 a 350 miliamperios) pero, después, el comportamiento es menos pronunciado, alcanzándose una mayor variación del ancho de pulso y menos variación de corriente, hasta llegar al límite donde al variar el ancho de pulso no se produce una variación de la corriente en el motor sin escobillas y sin carga.

### **Discusión y conclusiones**

De acuerdo con los resultados experimentales se puede observar que los motores sin escobillas ofrecen mejores condiciones de desempeño frente a un motor DC tradicional. En las pruebas sin carga se pudo determinar que el consumo de corriente es mayor en un motor sin escobillas frente a la curva de un motor DC; pese a que este último requiere de un circuito ESC para optimizar la potencia y controlar la velocidad del motor, es fácil de manejar si se tiene en cuenta que solo es necesario generar un pulso variable PWM que modifica la velocidad del motor.

Los motores sin escobillas tienen una zona en la que no se mueve el motor aun cuando se varía el ancho de pulso y esto sucede porque el motor no tiene la suficiente corriente para activar el campo electromagnético en sus bobinados, a diferencia de un motor DC que requiere menos corriente para iniciar la rotación; pero una vez superado el umbral –que, para este motor A2212/13t es de 100 miliamperios– inicia el movimiento del motor, sin tener una relación lineal entre el ancho de pulso y el consumo de corriente.

En este escrito solo se presentan las características principales para activar un motor sin carga; no obstante, el comportamiento de los consumos en estos motores tiene bastante variación cuando se agrega una carga, ya sea una hélice, una llanta, un peso, u otros elementos. Se espera haber causado curiosidad en el lector en búsqueda de una indagación posterior y de generar confianza para utilizar los motores sin escobillas en los proyectos, afianzando la idea de que estos tienen grandes ventajas y su uso está en aumento. Se invita a crear nuevos sistemas que mejoren la precisión, teniendo en cuenta que estos motores poseen gran fuerza (empuje) y velocidad.

## Referencias

- Cha, W., Kwon, J. y Kwon, B. (2016). Highly Efficient Asymmetrical pwm Full-Bridge Converter for Renewable Energy Sources. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63(5), 2945-2953. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7360928>
- Cotte, J., y Moreno, A. (2010). Diseño de control robusto de velocidad de motores Brushless para robótica aérea. [Tesis de grado]. Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/3397/jorgemariocottecorredor.2010.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Delgado, J. & Bolaños, C. (2013). Control de velocidad para motor dc brushless sin sensores. Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Electrónico. Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá. <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/13593/DelgadoJoseDavid2013.pdf>
- Ibrahim, M., Mahmood, A., y Sultan, N. (2019). Optimal PID controller of a brushless DC motor using genetic algorithm. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, 10(2). [https://www.researchgate.net/publication/333538450\\_Optimal\\_PID\\_controller\\_of\\_a\\_brushless\\_dc\\_motor\\_using\\_genetic\\_algorithm](https://www.researchgate.net/publication/333538450_Optimal_PID_controller_of_a_brushless_dc_motor_using_genetic_algorithm)
- Iperly, V., y Cruz, J. (2018). Simulación y automatización de los sistemas variadores de velocidad para motores de corriente continua. [Tesis de grado]. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/15735>
- Jiménez, A., Rodríguez, J., y Domínguez, A. (2017). Isolated Converter for Power Factor Improvement in a Brushless DC Motor Driver. *Ingeniería e Investigación*, 37(3), p.52-60. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=64354059007>
- M. Hussain, A. Ulasayar, H. Sheh Zad, A. Khattak, S. Nisar, and K. Imran. (2021). “Design and Analysis of a Dual Rotor Multiphase Brushless DC Motor for its Application in Electric Vehicles”, *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.*, vol. 11, no. 6, pp. 7846–7852. <https://etasr.com/index.php/ETASR/article/view/4345>.
- Matevosyan, R. (2021). Control vectorial del par motor de un motor brushless Doctoral dissertation. [Trabajo de grado]. Universitat Politècnica de València. <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/174859/Matevosyan%20-%20Control%20Vectorial%20del%20par%20motor%20de%20un%20motor%20brushless.pdf?sequence=1>
- MathWorks (s.f.). Universal Bridge Implement universal power converter with selectable topologies and power electronic devices. <https://la.mathworks.com/help/sps/powersys/ref/universalbridge.html;jsessionid=8ed80249af9c622de18e5780f6b4>
- Morales, C., y Redondo, M. (2017). Diseño y análisis de un pwm adaptado para propósitos educativos. *Hashtag*, 9, 11-20. <https://doi.org/10.52143/2346139X.n9.2016.508>
- Morales, J. (2018). Control de velocidad de motores brushless mediante modulación PWM. Trabajo de fin de estudios Ingeniería Eléctrica. [Trabajo de grado]. Universidad de Valladolid. <http://uva-doc.uva.es/handle/10324/30524>

- Pololu. (2020). Metal Gearmotor 37Dx73L mm 12V with 64 CPR Encoder (Spur Pinion). <https://www.pololu.com/product/2827>
- Rufian. (3 de enero de 2016). ¿Qué es un PWM y cómo funciona en Arduino? [Blog]. Rufian en la Red. <https://rufianenlared.com/que-es-pwm/>
- Texas Instruments. (2021). Hardware Design Considerations for an Electric Bicycle Using a BLDC Motor datasheet. <https://www.ti.com/lit/pdf/slva642>
- Seminario, J. (2021). Diseño de controlador de velocidad de motor brushless DC mediante la fuerza contraelectromotriz. [Trabajo de grado]. Universidad de Piura. <https://hdl.handle.net/11042/5357>
- Vera, J., Herrera, I., Águila, G., Sandoval, O., y González, B. (2018). Método experimental de estimación de la función de transferencia de un motor de cd utilizando encoder de cuadratura. *Pistas Educativas*, 39(128). <https://pistaseducativas.celaya.tecnm.mx/index.php/pistas/article/view/1149>