

**SISTEMA CONTROLADO PARA OPERACIÓN DE MOTORES BRUSHLESS
ORIENTADO A ENSEÑANZA/APRENDIZAJE.**

ALEXANDER FUENTES TRUJILLO

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL MONTERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
MONTERÍA**

2022

**SISTEMA CONTROLADO PARA OPERACIÓN DE MOTORES BRUSHLESS
ORIENTADO A ENSEÑANZA/APRENDIZAJE.**

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTRÓNICO**

ALEXANDER FUENTES TRUJILLO

**DIRECTOR:
ING. MIGUEL ÁNGEL ORTIZ PADILLA
INGENIERO ELÉCTRICO**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL MONTERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
MONTERÍA**

2022

DEDICATORIAS

Este proyecto se lo dedico a mis padres, abuelos, maestros y compañeros.

Mis padres y abuelos por siempre estar apoyándome, ayudándome y por todas esas ocasiones en las que me dijeron “hágale, hijo, que usted puede” cuando yo sentía no poder.

Mis maestros por haberme enseñado esta profesión, ayudarme con mi crecimiento personal, profesional y por dejarme esta sensación que en sus clases sentía, de enseñarme porque realmente quieren educar en vez de hacerlo por ser un trabajo.

Por último, a mis compañeros por haberme acompañado en todo este proceso de crecimiento y formación, todas esas ocasiones en la que me brindaron su ayuda fueron simplemente tan esenciales para mí.

Alexander Fuentes Trujillo

AGRADECIMIENTOS

Le agradezco a mi profesora Ana Milena López López por siempre ayudarme y brindarme su asesoría cuando ella notaba que lo necesitaba o cuando le pedía esa ayuda; a mi asesor Miguel Angel Ortiz Padilla quien, a pesar de yo estar solo en este proyecto, me hizo sentir como si no fuera así, su atención y asesoría durante todo el desarrollo del proyecto fue para mi tan indispensable. A ellos dos, realmente les agradezco por todo el tiempo que dedicaron en ayudarme.

A mis compañeros Emanuel Hernandez Medina, Bryan Andres Ortiz Gonzalez y Néstor Luis Martinez Solano por todo su acompañamiento, consejo y ayuda durante el desarrollo de este proyecto, ellos lograron que pueda disfrutar aún más la realización de este.

Alexander Fuentes Trujillo

CONTENIDO

| | |
|--|-----------|
| 1. Resumen: | 7 |
| 2. Abstract:¡Error! Marcador no definido. | |
| 3. Introducción: | 7 |
| 4. Marco Teórico/Estado del Arte: | 9 |
| 4.1. Motores brushless | 9 |
| 4.2. Componentes del motor brushless: | 10 |
| 4.3. Funcionamiento del motor brushless:..... | 11 |
| 4.4. Bobinados del motor..... | 12 |
| 4.5. Controles ESC (electronic speed controller)..... | 13 |
| 4.6. Estado del arte: | 14 |
| 5. Metodología | 16 |
| 5.1. Puente trifásico..... | 16 |
| 5.2. Circuito detector de BEMF | 19 |
| 5.3. Circuito para graficación | 19 |
| 5.4. Multiplexores | 20 |
| 5.5. Diseño de PCBs | 20 |
| 5.6. Periféricos | 23 |
| 5.7. Base | 23 |
| 5.8. Programa..... | 25 |
| 6. Resultados y discusión | 27 |
| 7. Conclusiones y recomendaciones: | 29 |
| 8. Bibliografía | 31 |
| 9. Anexos | 32 |
| 9.1. Manual:..... | 32 |
| 9.2. Video: | 32 |
| 9.3. Artículo: | 32 |

Lista de Figuras:

| | |
|--|----|
| Figura 1 Crecimiento del mercado de motores brushless en china con sus expectativas. | 8 |
| Figura 2. Señales del ESC | 11 |
| Figura 3 Tipos de conexiones de los embobinados | 12 |
| Figura 4 Conexión del motor al controlador..... | 13 |
| Figura 5 Primer diseño puente trifásico. | 16 |
| Figura 6. Montaje experimental del primer diseño puente trifásico. | 16 |
| Figura 7 Segundo circuito puente trifásico. | 17 |
| Figura 8 Segundo circuito puente trifásico en protoboard. | 17 |
| Figura 9 Tercer diseño para puente trifásico. | 18 |
| Figura 10 Circuito detector BEMF | 19 |
| Figura 11 Circuitos para poder graficar las señales del motor. | 19 |
| Figura 12 Diseño de la primera PCB..... | 20 |
| Figura 13 Diseño de la segunda PCB. | 21 |
| Figura 14 Diseño de la tercera PCB..... | 22 |
| Figura 15 Tercer diseño de puente trifásico instalado en la cara inferior de la tercera PCB..... | 23 |
| Figura 16. Diseño de base en forma de L. | 24 |
| Figura 17 Vista de prototipo. | 24 |
| Figura 18 Diagrama de flujo programa del motor | 25 |
| Figura 19 Aplicaciones del motor brushless en diversos sectores | 29 |

1. Resumen:

Este proyecto parte considerando como problema el poco conocimiento de los motores *brushless* en los estudiantes de ingeniería electrónica de la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Montería, el enfoque se da a estos estudiantes por ser un motor de control completamente electrónico.

Esta tecnología ha obtenido una gran relevancia en todo el mundo por ser superior a otras como se mencionará en el marco teórico, al ser una tecnología con una demanda en crecimiento será muy útil para los futuros ingenieros electrónicos saber sobre ellos sí llegan a laborar en campos donde se usen estos motores

En este proyecto se diseñó e implemento un módulo para el control y aprendizaje de motores brushless, con los circuitos fundamentales para su funcionamiento siendo estos de diseños propios del autor. Estando cada uno de estos circuitos separado del otro para observar el comportamiento individual de cada uno, convirtiendo esto en una herramienta de introducción a esta tecnología para los estudiantes de ingeniería electrónica.

2. Introducción:

En el mundo moderno debido a que la gran mayoría de nuestros dispositivos y la industria utilizan estas máquinas, desde un simple juguete hasta equipos de soporte vital para las personas, ofreciendo una amplia gama de aplicaciones en diferentes sectores económicos de la sociedad.

Entre ellos se encuentra el motor brushless, nacido de la problemática del desgaste de escobillas en los motores de corriente directa, motores de corriente directa con una conmutación electrónica, esa única característica provoca que este motor tenga

ventajas sobre los motores de corriente directa e inducción. Esto ha llevado a la demanda de motores brushless en ascenso.

Figura 1

Crecimiento del mercado de motores brushless en china con sus expectativas.

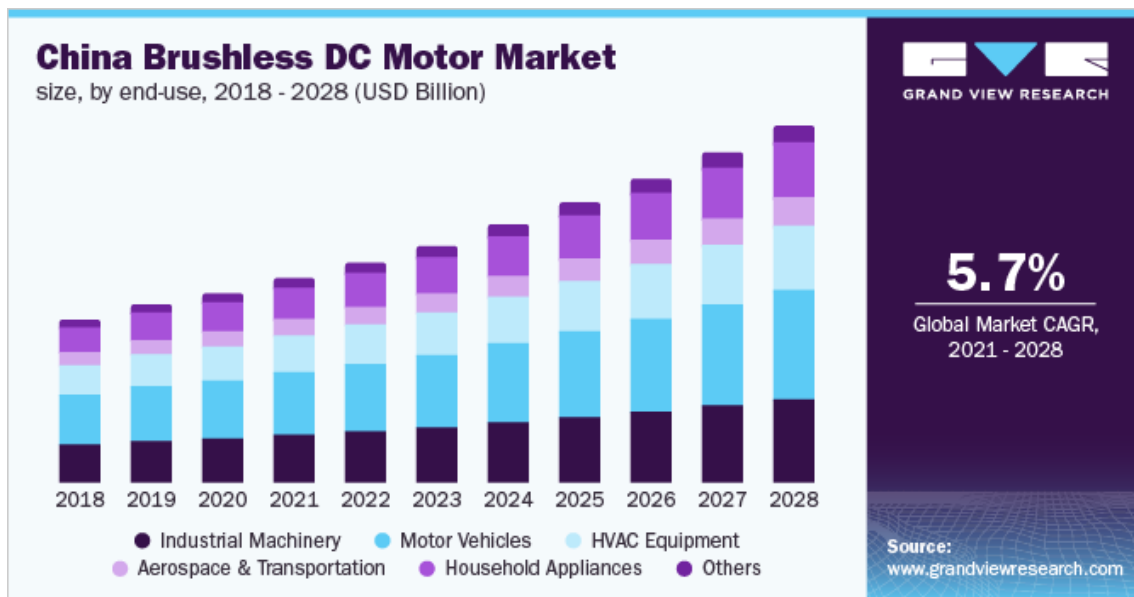


Gráfico con las expectativas del crecimiento del mercado de motores Brushless en china. Tomado de (Grand view research – China brushless 2018-2028)

Estos motores han estado generando una gran demanda durante los últimos años. El tamaño del mercado mundial de motores brushless (BLCD) se valoró en USD 17 100 millones en 2020 y se espera que crezca a una tasa de crecimiento anual compuesto (CAGR) del 5.7% de 2021 a 2028 como se muestra en la **Figura 1**. Hay evidencias muy claras de como los motores brushless y sus derivaciones dominaran por completo en el mercado en una gran variedad de sectores, entonces aprender sobre estos motores podrá ser de gran utilidad para futuros ingenieros electrónicos

A partir de una encuesta realizada durante la ejecución del proyecto a una muestra de estudiantes de quinto y noveno semestre en el año 2022 de la facultad de Ingeniería Electrónica en la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Montería sobre el conocimiento que poseen de los motores brushless, se encontró que el 60% de ellos conocen los motores brushless, de todos los encuestados, solo el 13,3% conoce del funcionamiento básico de estos motores.

Aquellos que conocen del funcionamiento básico de estos es porque han aprendido de ellos por la información en internet, pero no en sus estudios profesionales, cambiar esta situación es el propósito de este proyecto, el ofrecer una herramienta para el aprendizaje didáctico de los motores brushless.

Se espera que los estudiantes tengan un mayor conocimiento sobre el funcionamiento, control y software de los motores brushless junto a una visión más amplia de todo lo que pueden hacer con ellos junto a su gran importancia en el presente y el futuro, consiguiendo un impacto en el uso y aprendizaje de esta nueva tecnología por parte de la Universidad Pontificia Bolivariana (UPB). También se espera llamar la atención la facultad de ingeniería mecánica por todos los dispositivos mecánicos y maquinas que están usando estos motores.

Por esto se llevó a cabo la creación de esta herramienta didáctica que sirva de apoyo para que los estudiantes de las facultades antes mencionadas puedan aprender de ellos.

En este documento se describe el proceso de cómo se realizó este proyecto y algunas estadísticas y comparaciones del porque se le da esta importancia a los motores brushless en este proyecto.

3. Marco Teórico/Estado del Arte:

3.1. Motores brushless

Los motores brushless son aquellos que funcionan por conmutación electrónica, en su estator están ubicados los embobinados y en el rotor los imanes.

3.1.1. Ventajas de un motor brushless frente a un motor de inducción

- Al necesitar controlar la dirección de giro y velocidad de un motor de inducción se necesitan varios dispositivos y componentes mecánicos; un brushless sólo necesita un circuito de control sin componentes mecánicos.
- Los motores brushless no requieren circuito de arranque.
- Un motor brushless presenta mejor relación velocidad-par motor.
- Mayor rango de velocidad.

- Mayor eficiencia.
- La relación par motor-tamaño es mucho mayor, lo que implica que se puedan emplear en aplicaciones donde se trabaje con un espacio reducido (Becerra, 2011) (Rippel, 2022)

3.1.2. Ventajas de un motor brushless frente a un motor DC con escobillas:

- Las escobillas se desgastan con el tiempo debido a la fricción. La vida útil típica de los motores con escobillas es de alrededor de 2000 horas, mientras que un motor sin escobillas normalmente durará 10000 horas (tenga en cuenta que estos números solo deben usarse como reglas generales, ya que hay una gran cantidad de factores que influirán en la vida útil del motor).
- Las escobillas provocan chispas y ruido eléctrico dentro del motor.
- La fricción creada por las escobillas limita la velocidad máxima del motor y puede generar problemas de calor.
- Como los electroimanes están en el estator, es más fácil mantenerlos fríos mediante disipación de calor u otras técnicas de enfriamiento.
- Los electroimanes que se montan en el estator también facilitan el aumento de la precisión del control dentro del motor.
- El desgaste de las escobillas genera partículas residuales que se acumulan dentro del motor.

La desventaja de los motores brushless frente a los motores DC con escobillas y de inducción es su precio más elevado y el funcionamiento de su circuito de control es más complejo, pero el coste del motor se ve respaldado por el bajo mantenimiento que necesita. Por el lado de su circuito de control, es complejo por su funcionamiento, pero el usarlo e instalarlo es igual de sencillo a un sistema de control de motor con escobillas (Pascual Vega, 2019).

3.2. Componentes del motor brushless:

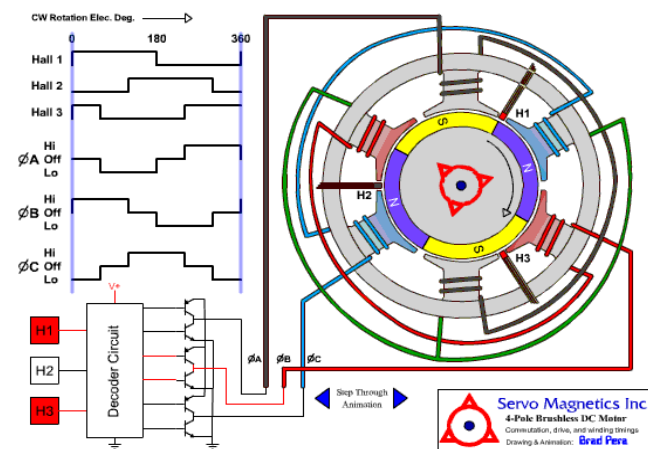
Los motores brushless están compuestos por una parte móvil que es el rotor, que es donde se encuentran los imanes permanentes, y una parte fija, denominada estator o carcasa, sobre la cual van dispuestos los bobinados de hilo conductor. La imagen refleja una sección de uno de estos motores en donde puede verse la disposición de los bobinados y los imanes permanentes (en este caso son de neodimio) (Delgado & Bolaños, 2013).

3.3. Funcionamiento del motor brushless:

Como su propio nombre indica, brushless significa "sin escobillas". En este tipo de motor DC la corriente pasa directamente por los embobinados del estator. El campo magnético generado por el flujo de esta corriente interactúa con el campo magnético de los imanes permanentes ubicados en el rotor, produciendo repulsión y atracción entre esos campos magnéticos, de la variación del campo magnético de los embobinados en el estator dependerá el giro fluido del motor.

Figura 2

Señales del ESC



Tomado de:

https://electronoobs.com/circuitos_tut4.php

Para conseguir que el motor gire de manera continua, hay que conseguir que sus bobinados sean capaces de generar un campo magnético que sea perpendicular a la dirección del campo magnético de los imanes permanentes, ya que es en estas condiciones el par generado es máximo, y lo que nos interesa es que el valor de este par sea máximo en todo momento. Una vez que el rotor inicia su movimiento de giro, la dirección del rotor es variable en cada instante, y por lo tanto en cada momento, tendremos que conocer en qué posición se encuentra el rotor, para poder excitar las bobinas que correspondan para conseguir ese par máximo en ese instante determinado. El elemento que controlará eso es el controlador electrónico de velocidad (ESC), dependiendo de la posición del rotor respecto al estator el ESC energizará alguno de los embobinados del motor para hacerlo girar con las señales que se observan en la **Figura 2**.

Hay un parámetro importante que debemos considerar, que es factor "kV". Normalmente aparece junto al número de vueltas de bobinado del motor, y lo que

nos indica es el número de revoluciones por minuto a las que es capaz de girar el motor por cada Voltio de electricidad que se le aplica. A mayores valores para el kV, mayores valores de velocidad, pero menores valores de par y viceversa.

- **Motor brushless sensored:** los motores sensored cuentan con sensores que determinan la posición durante el giro del roto, esta información es enviada al ESC para energizar al embobinado correspondiente para continuar con el giro del rotor.
- **Motor brushless sensorless:** este tipo de motores no tienen sensores, entonces el ESC para saber la posición del motor y cual embobinado debe energizar analiza los picos de voltaje que generan los embobinados para conocer esa información.

En altas velocidades ambos tipos de motores funcionan, pero en bajas velocidades se deben usar los motores brushless sensored, pues a bajas velocidades no se producirán los picos de voltajes en los embobinados necesarios para que el ESC conozca la posición del rotor, entonces se usan los sensores (Jimbo Tacurri, 2015).

3.4. Bobinados del motor

Un embobinado es un material conductor eléctrico enrollado, en el caso de los motores, suele ser hilo de cobre esmaltado. Son los encargados de generar un campo magnético que interactúa con el de los imanes cuando por ellos circula una corriente eléctrica.

La relación entre la velocidad es inversamente proporcional al número de vueltas del embobinado; un menor número de vueltas en el bobinado implica una velocidad mayor en el motor; pero a su vez obtendremos menor torque (Chambilla, 2019). La conexión de los embobinados en el motor puede ser de tipo estrella o delta, como se muestra en la

Figura 3.

Figura 3

Tipos de conexiones de los embobinados

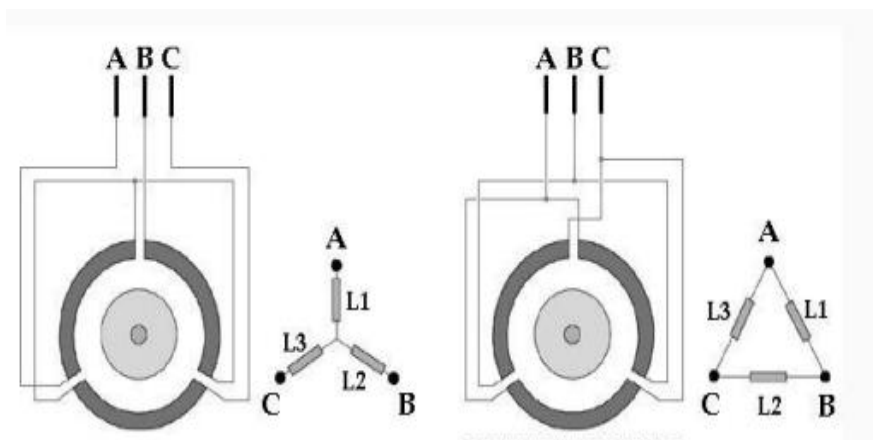
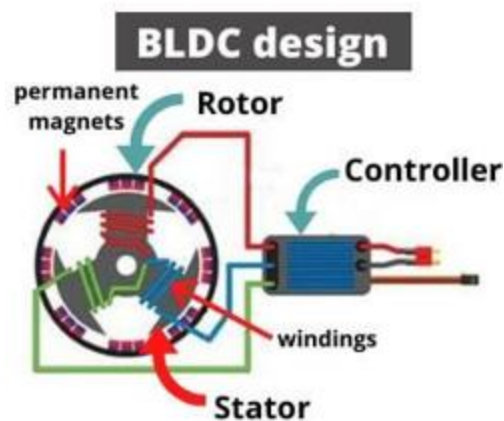


Figura 4

Conexión del motor al controlador



Tomado de: <http://eltrade.sk/es/whats-difference-between-brushed-and-brushless-dc-motors>

La conexión delta ofrece mayor velocidad y menos torque mientras la conexión estrella ofrece mayor torque, pero menos velocidad. Los puntos A, B y C se conectarían al ESC para controlar el motor, como se muestra en la **Figura 4**.

3.5. Controles ESC (electronic speed controller)

Un variador de velocidad (ESC) está compuesto por un circuito con varios componentes. El propósito del variador es controlar la velocidad de un motor eléctrico junto con el sentido de giro.

3.5.1. Componentes del ESC:

Un ESC tiene muchos componentes como condensadores, resistencias entre otros, pero sus componentes más destacables son el microcontrolador, los transistores para un puente trifásico y los amplificadores operacionales (para los controladores de brushless sensorless).

- **Microcontrolador:** recoge toda la información de las entradas. Alberga el programa para el funcionamiento del circuito y controla el puente trifásico.
- **Puente trifásico:** este puente trifásico está formado por 6 transistores, cada transistor es controlado por el microcontrolador. En las salidas del puente trifásico está el motor, cada par de transistores a una de las terminales del motor, ese par conectará el respectivo terminal de los motores a VCC, GND o lo dejará al aire, hay tres pares de transistores y tres terminales del motor, entonces aquí se hará la conmutación para energizar los embobinados.
- **Amplificadores operacionales:** son tres amplificadores operacionales, cada uno conectado a una terminal del motor, estos trabajarán en forma de comparadores midiendo el voltaje en el terminal del motor que este en aire, al medir ese nivel de voltaje al amplificador le llegará el pico de voltaje que indica que se debe hacer el siguiente paso de conmutación de los embobinados, esa información llegará al microcontrolador y este mandará al puente trifásico hacer la siguiente conmutación, el ciclo se repetirá cada vez que le llegue un pico de voltaje por parte del terminal libre del motor a su respectivo amplificador. Este sistema solo se usa en los motores que no tienen sensores.
- **Otros componentes:** el resto de las componentes cumplen las funciones de protección, regulación y asegurarse de un correcto funcionamiento del circuito. Un gran porcentaje de los ESC funcionan con mando a distancia entonces también tienen componentes para realizar esa comunicación inalámbrica (Martín & Gastelo, 2019)

3.6. Estado del arte:

Se encontraron los siguientes proyectos relacionados a los motores brushless o educación.

Tabla 1

Revisión del Estado del Arte

| Título | Nivel | Autores | Desarrollo |
|--|---------------|--|---|
| DISEÑO DE CONTROL ROBUSTO DE VELOCIDAD DE MOTORES BRUSHLESS PARA ROBOTICA AEREA | Nacional | Jorge Mario Cotte Corredor, Andres Felipe Moreno Pineda | <p>En este proyecto también resaltan las ventajas de los motores brushless frente los motores convencionales, mencionando también el importante aumento de los motores brushless en su desarrollo y empleo en los sectores industriales del automóvil, aeroespacial, sanitario, así como en equipos de automatización e instrumentación:</p> <p>Realizaron una serie de ensayos para poder establecer una comparativa de prestaciones entre máquinas de distintos fabricantes o con diferentes innovaciones. En este artículo se describe la implementación de un banco de ensayos que permite realizar el ensayo de forma totalmente automatizada y así conocer las prestaciones de dicho motor para su aplicación.</p> |
| MODULO SENSOR PARA EL CONTROL DEL PROCESO DE LLENADO DE UN TANQUE DE AGUA COMO HERRAMIENTA PEDAGÓGICA Y PARA APLICACIONES AGROINDUSTRIALES. | Regional | Sandra Milena Echenique Díaz Mauricio José García Contreras | <p>En este proyecto se diseñó e implemento un módulo para un sistema de llenado de tanques acrílicos transparentes, que fue ubicado en laboratorio de control digital en la facultad de ingeniería electrónica de la universidad Pontificia Bolivariana seccional Montería, que puede ser utilizado como una herramienta pedagógica para que los estudiantes manipulen la configuración del sistema, cambiando los niveles en el tanque y así observar el comportamiento de este.</p> |
| Hybrid Fuzzy Fractional-Order PID-Based Speed Control for Brushless DC Motor. | Internacional | M. A Mohammed Eltoum, A. Hussein, M. A. Abido | <p>Este artículo presenta un esquema de control híbrido novedoso para el control de velocidad del motor de CC sin escobillas (BLDC) al controlar simultáneamente la corriente de referencia del motor BLDC y el voltaje del bus de CC del inversor. Se emplea un controlador PID de orden fraccional (FOPID) para controlar la corriente de referencia del motor BLDC mientras que un controlador de lógica difusa manipula el voltaje del bus de CC del inversor. Se desarrolla una técnica metaheurística de búsqueda de armonía modificada (HS) para el ajuste de parámetros del controlador FOPID. Se aplican tres condiciones de operación diferentes para probar el motor, incluida la operación sin carga, la operación con carga variable y la operación con velocidad variable para verificar la efectividad del controlador propuesto. Además, la estrategia de control híbrido propuesta se ha comparado con esquemas de control de velocidad basados en Fuzzy y FOPID. Los resultados obtenidos confirman que el esquema de control propuesto proporciona un control de velocidad mejor y más preciso en un amplio rango de velocidades. Además, el controlador propuesto disminuye las ondulaciones de par bajo diferentes condiciones de operación.</p> |

4. Metodología

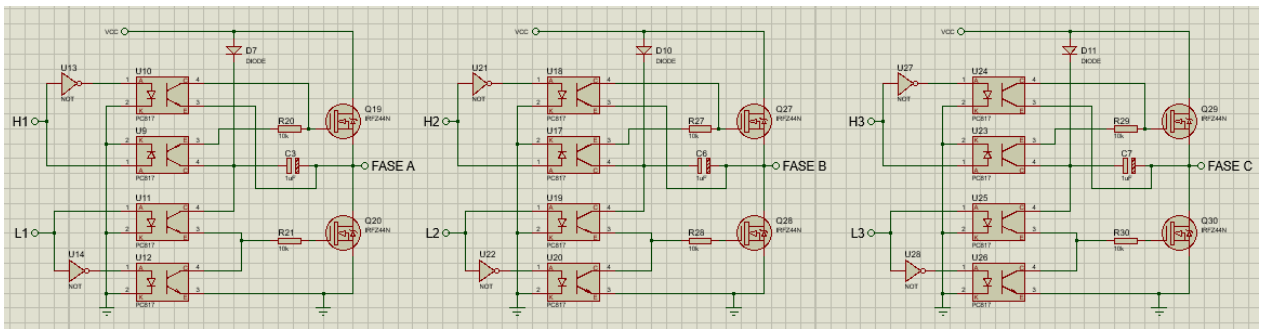
4.1. Puente trifásico

Se empezó por el diseño de este circuito, porque del correcto funcionamiento de este, depende la calidad de movimiento del motor y el resto del proyecto. El primer diseño fue basado en un control con optoacopladores PC817 como se muestra en la figura 5. Se optó por este ya que es un diseño simple, económico y en caso de un componente dañado, sería fácil su remplazo.

$$n_{conm} = \frac{11700}{60} \times 42 = 8190 \quad \text{Ecuación 1}$$

Figura 5

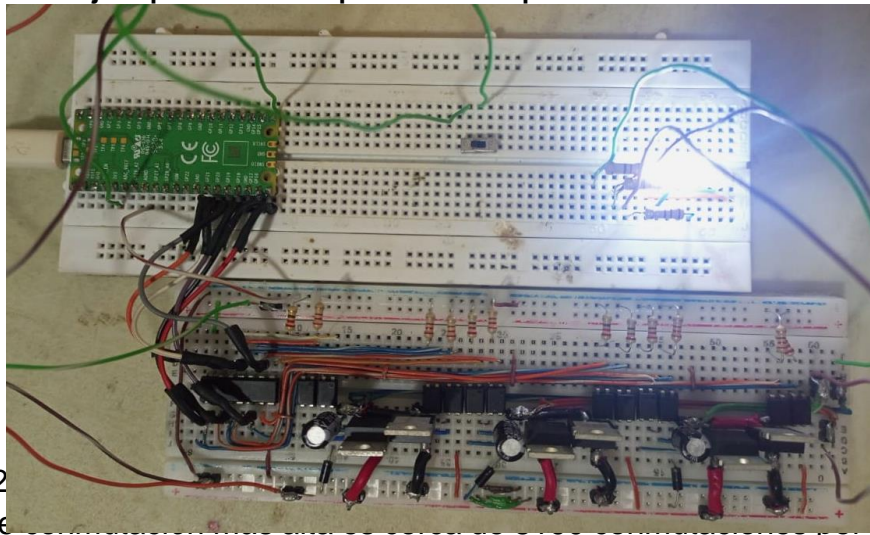
Primer diseño puente trifásico.



Autoría propia del autor.

Figura 6

Montaje experimental del primer diseño puente trifásico.



El motor A22
frecuencia de

tonces la
segundo,

Autoría propia del autor.

como se obtuvo en la **Ecuación 1**. El PC817 según su hoja de datos tiene un tiempo de subida y bajada de $36\mu s$ como máximo, es decir tolera una frecuencia de 27kHz, entonces se procedió a armar el circuito de prueba y conectarlo a la tarjeta Raspberry Pi Pico para controlarlo, como se muestra en la

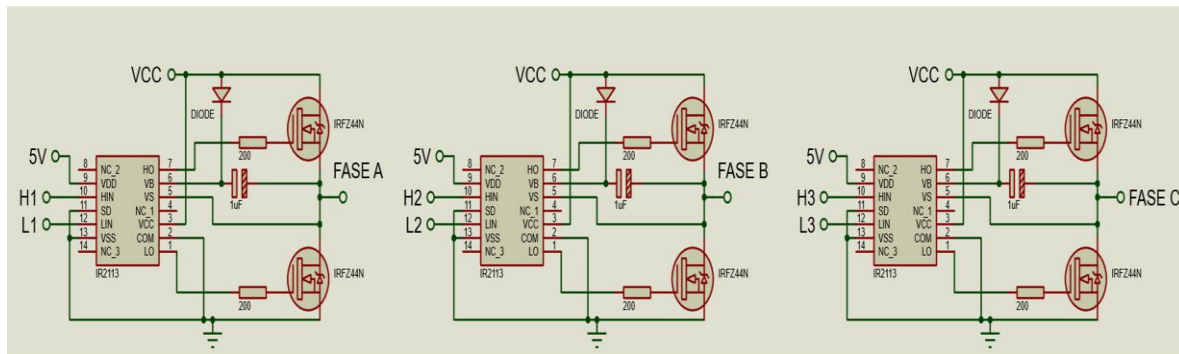
Figura 6.

Por razones que se explicarán en los resultados, se pasó a diseñar e implementar un segundo circuito. En el segundo diseño se reemplazaron los optoacopladores por el circuito integrado IR2113 como se muestra en la **Figura 7**, un circuito integrado hecho para el control de MOSFET e IGBT. Con el circuito de la

Figura 8 en protoboard, se empezó a probar con el motor y este aparentemente funcionaba bien. Sin embargo, por razones que también se explicarán en los resultados, se procedió a rediseñar el circuito del puente trifásico, obteniendo un tercer diseño para este circuito. Con el tercer diseño (Ver **Figura 9**), se obtuvieron buenos resultados (más detalles de ello en la sección de resultados).

Figura 7

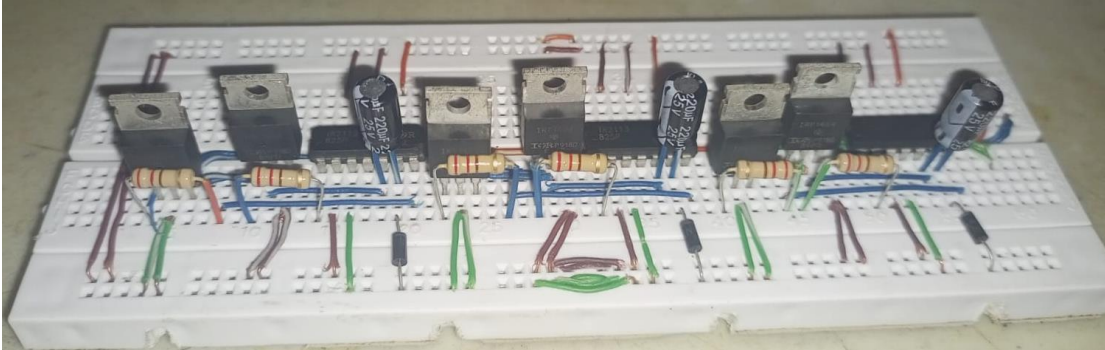
Segundo circuito puente trifásico.



Autoría propia del autor.

Figura 8

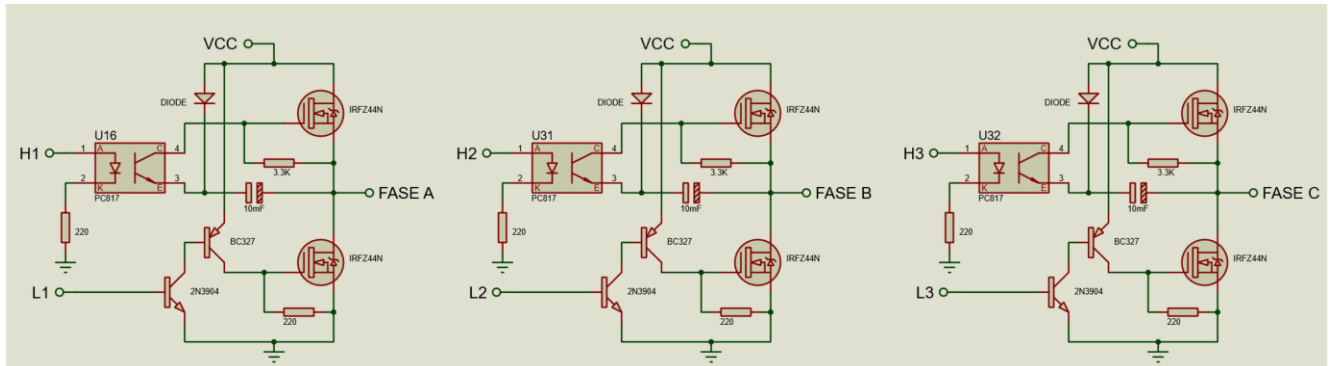
Segundo circuito puente trifásico en protoboard.



Autoría propia del autor.

Figura 9

Tercer diseño para puente trifásico.

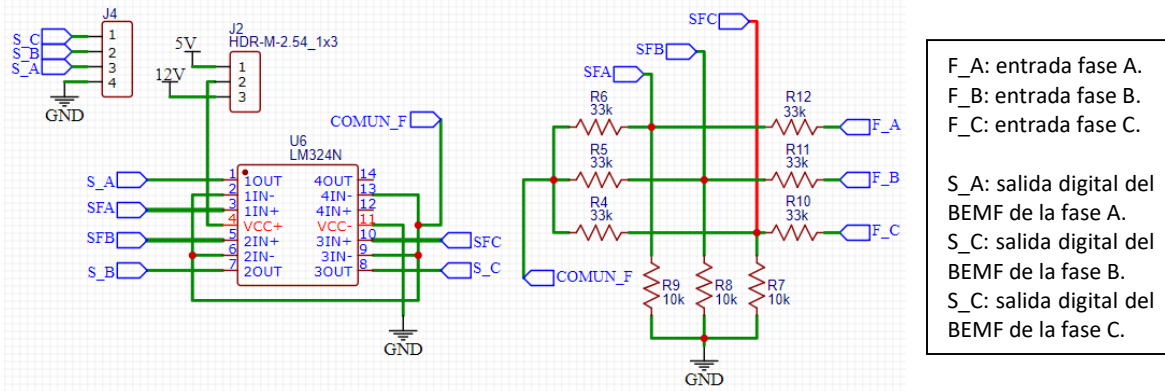


Autoría propia del autor.

4.2. Circuito detector de BEMF (*Back Electro-Motive Force*)

Figura 10

Circuito detector BEMF



Autoría propia del autor.

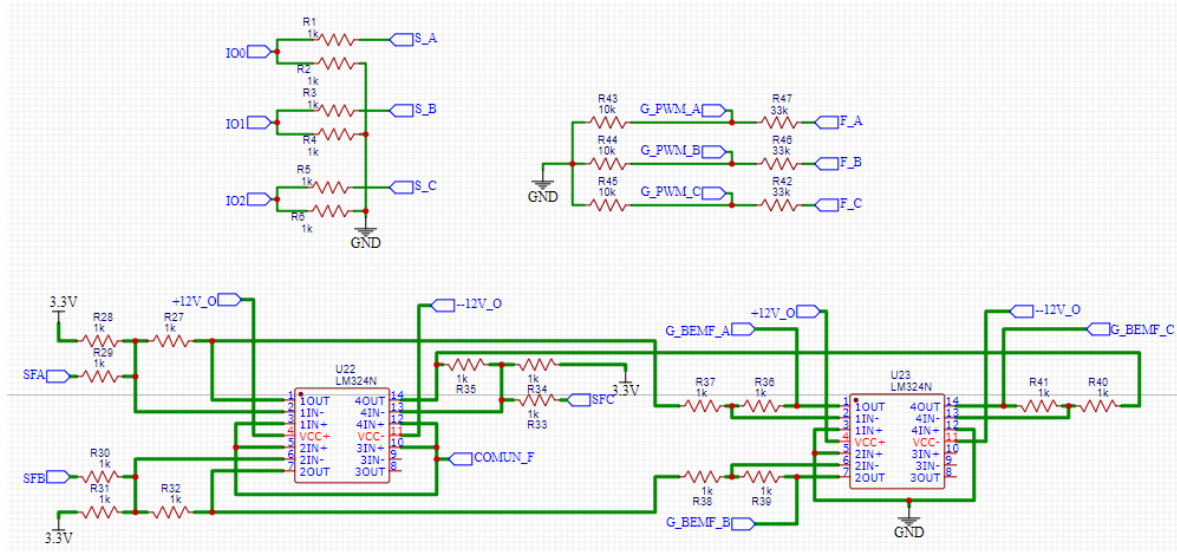
En la **Figura 10** se muestra el circuito encargado de dar la señal de cambio de paso, consiste en un amplificador que compara el voltaje de cada fase respecto a la suma de voltaje de las 3 fases.

4.3. Circuito para graficación

Se necesita ver las señales enviadas al motor y las obtenidas por la retroalimentación para comprender mejor el funcionamiento y control de un motor brushless, por esa razón se agrega un circuito que regule estas señales para que puedan ser leídas por el microcontrolador. Estos circuitos necesarios son divisores de voltaje y otro circuito para reducir la amplitud y voltaje pico a pico de las fases a un voltaje que tolere el microcontrolador, esquemático de este circuito en **Figura 11**.

Figura 11

Circuitos para poder graficar las señales del motor.



Autoría propia del autor.

4.4. Multiplexores

Al ser más de 9 señales las necesarias leer en el microcontrolador entre ellas señales analógicas y digitales, entonces se debió usar multiplexores para hacer llegar todas estas señales al microcontrolador, el multiplexor CD4051BE. Se usan dos multiplexores, uno para las señales de retroalimentación del motor y otro para las señales a graficar.

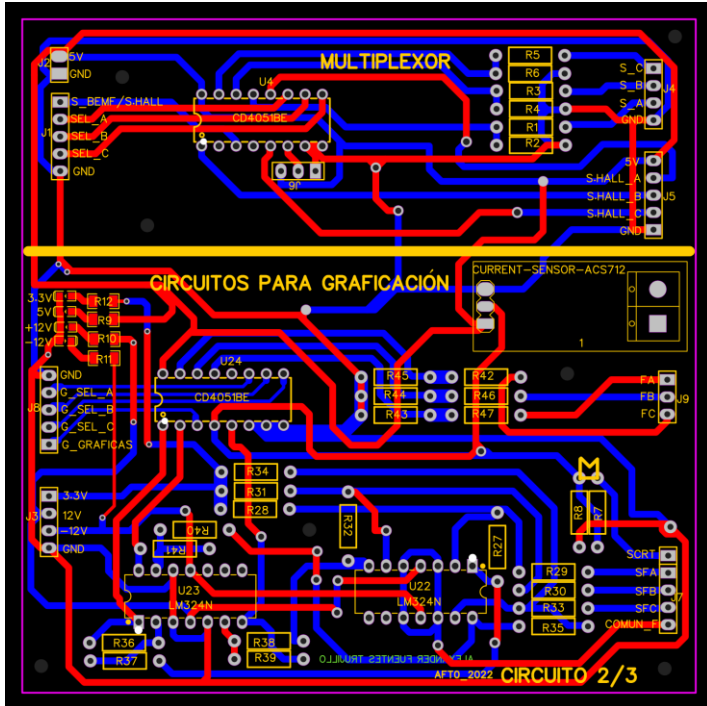
4.5. Diseño de PCBs

Con los circuitos diseñados se precedió a empezar el diseño de las PCBs, en 3 tarjetas. La primera tarjeta para alojar el microcontrolador; en la segunda tarjeta se ubicaron los multiplexores, los circuitos para graficar y el sensor de corriente ACS712. Por último, en la tercera tarjeta se ubicó al puente trifásico junto con el detector BEMF ya que estos dos son los únicos circuitos que se conectan con el motor. Estos circuitos fueron diseñados en el software Easy-EDA (Ver **Figura 12**, **Figura 13** y **Figura 14**).

Figura 12

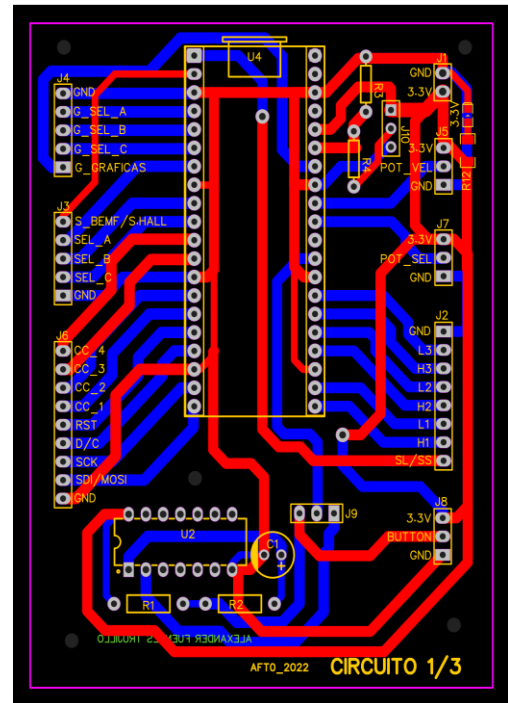
Figura 13

Diseño de la segunda PCB.



Autoría propia del autor.

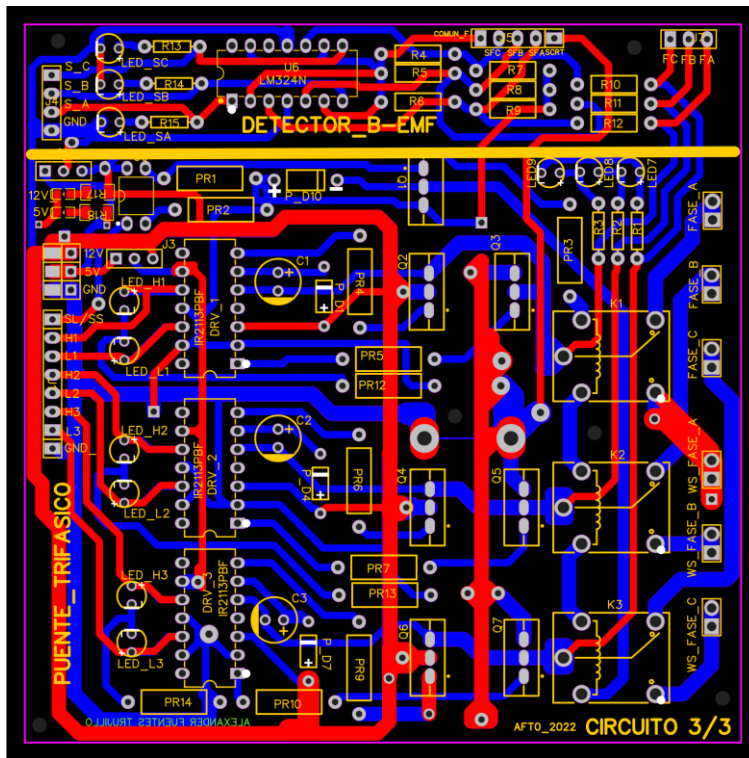
Diseño de la primera PCB.



Autoría propia del autor.

Figura 14

Diseño de la tercera PCB



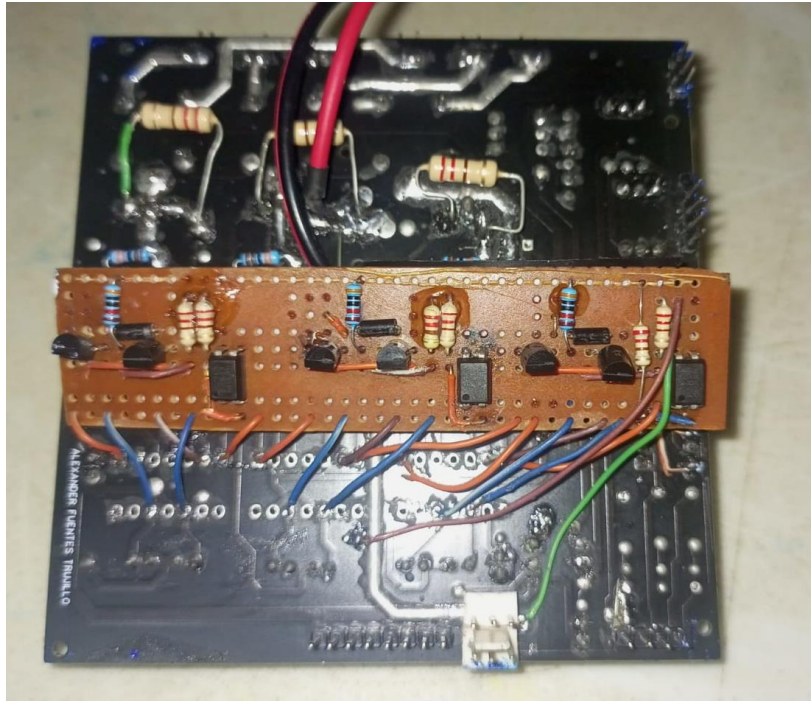
Autoría propia del autor.

Terminados de diseñar y después de una revisión, se enviaron los diseños a la empresa JLC-PCB para su fabricación. Las razones por la que se hicieron 3 diseños de PCB en lugar de un solo diseño, fueron económicas.

Llegadas las PCBs, la primera PCB a la que se le soldó los componentes fue la “PCB circuito 3/3”, para probar el puente trifásico nuevamente, pero este puente fue el segundo diseño de puente trifásico, el de la **Figura 7**, pues en este punto los problemas que presentaba este diseño aún no habían sucedido. Fue el tercer día con la tercera PCB soldada, que el puente trifásico se empezó a dañar cuando superaba los 1,7A o ante picos de corriente superiores a las 2A, así que después de un mes de estar buscando la razón de este daño, se decidió por hacer el tercer diseño de puente trifásico de la **Figura 9**, para poder instalar este circuito en una PCB ya echa, se soldaron los componentes del nuevo puente trifásico en una PCB perforada y se conectó a la PCB por la cara inferior, como se muestra en la **Figura 15**, sobre este cambio de diseño se darán más detalles en los resultados.

Figura 15

Tercer diseño de puente trifásico instalado en la cara inferior de la tercera PCB.



Autoría propia del autor.

4.6. Periféricos

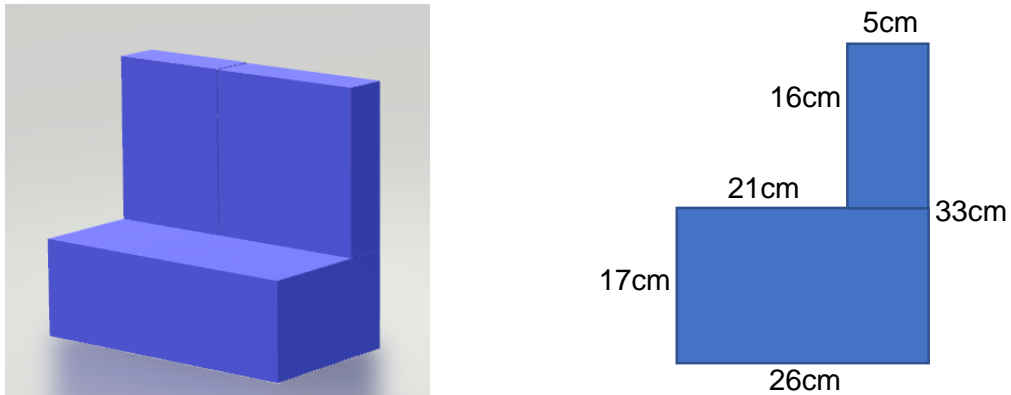
- Se instalaron 3 pantallas tft de 2,4 pulgadas, dos pantallas para graficas las señales del motor y una pantalla con táctil para mostrar datos, seleccionar el sentido de giro del motor y activar o desactivar el motor secundario.
- Dos potenciómetros para controlar la velocidad del motor
- Un botón tipo pulsador para para de emergencia del motor

El uso de estos periféricos esta detallado en el manual anexo.

4.7. Base

Con todo el material físico para hacer el montaje, se empezó a realizar la base en donde poner todos los componentes, para ello se pensó en una caja en forma de “L”.

Figura 16.



Diseño de base en forma de L

Autoría propia del autor.

Para armar esta base se usó madera trípex, se hicieron 6 rectángulos con las siguientes medidas:

- 17cm de alto y 30cm de ancho
- 16cm de alto y 30cm de ancho
- 5cm de alto y 30cm de ancho
- 30cm de alto y 21cm de ancho
- 33cm de alto y 30cm de ancho
- 26cm de alto y 30cm de ancho

Construidas todas las piezas, se le hicieron las perforaciones necesarias para poder ubicar los componentes y terminar de armar la base. Se pintó de color azul marino y se pusieron todos los componentes.

Figura 17

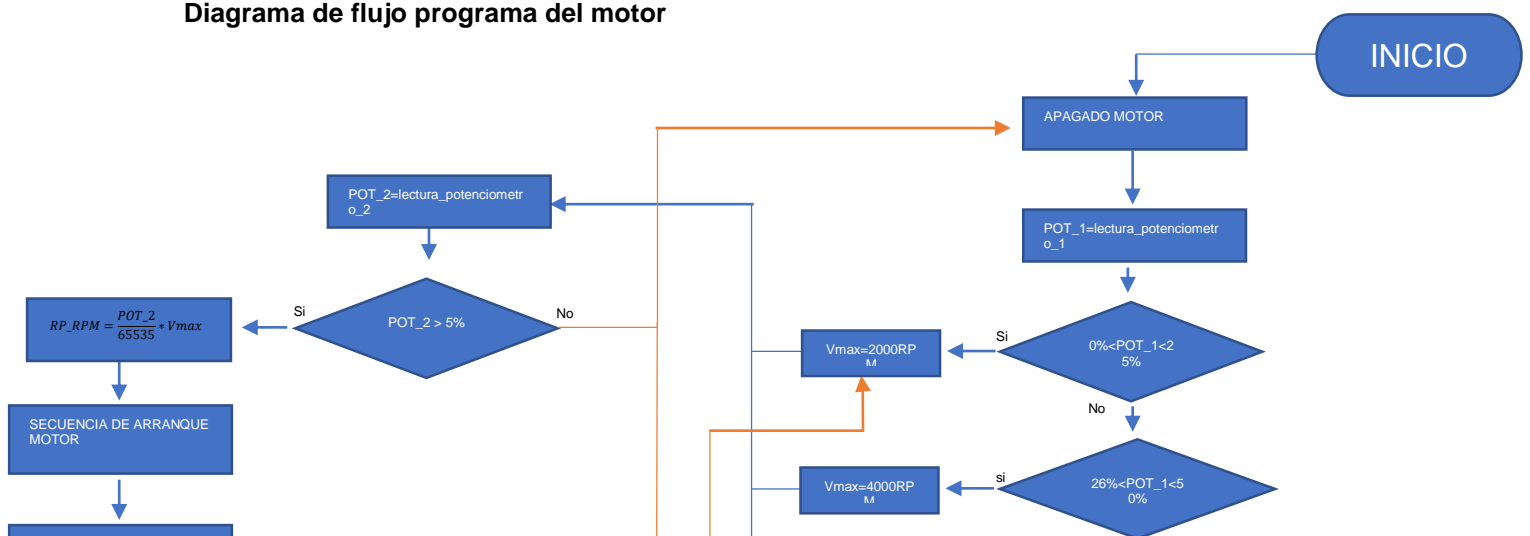
Vista de prototipo



4.8. Programa

Figura 18

Diagrama de flujo programa del motor



La tarjeta Raspberry Pi Pico posee un microprocesador con doble núcleo, por ello el programa en lenguaje MicroPython es doble hilo, un hilo encargado para solamente el control del motor y el segundo hilo encargado de la toma de datos y control de las pantallas para graficar y muestreo de datos.

Esta es la razón principal por la que se decidió usar la Raspberry Pi Pico, se puede estar procesando toda la información para graficar y controlando las pantallas paralelamente al programa del motor sin afectar a este.

El programa para el control del motor tiene 4 modos de giro, estos se explican en el manual de uso, estos modos usan lazo abierto o cerrado. Siendo el lazo abierto solo usado cuando el motor gira demasiado lento como para hacer uso del BEMF, el lazo cerrado se usa para detectar cambios en la posición del rotor del motor, con esto el programa detecta los momentos en que debe hacer las conmutaciones en los embobinados del motor, también se logra obtener la velocidad del motor, permitiendo un control proporcional en la velocidad del motor, la manera de cambiar el punto de referencia de velocidad del motor es a través del potenciómetro.

En el primer núcleo de la Raspberry Pi Pico se ejecuta el programa encargado de procesar las señales, toma de datos, control de las pantallas e interacción con todos los periféricos, en el segundo núcleo se ejecuta el programa encargado de controlar y mantener el giro del motor

5. Resultados y discusión

Como se propuso, se obtuvo un sistema en el que se puede apreciar cada sección necesaria para el funcionamiento del motor brushless. El puente trifásico implementado se obtuvo a partir del rediseño experimental, puesto que en el primer diseño, los optoacopladores presentaban un retraso en la respuesta de su salida, lo que limitaba la corriente del puente a 800mA porque con corrientes superiores, los MOSFETs alcanzaban temperaturas dañinas, superiores a los 100°C; con relación al segundo diseño de puente trifásico, este experimentaba picos de corrientes aproximadamente a los 1,7A o superior que provocaban daños en los circuitos integrados IR2113 dejando inservible todo el puente trifásico. Con el tercer diseño para el puente trifásico, se obtuvieron picos 13A sin provocar y 5A de manera continua durante 10 minutos sin provocar daños al circuito, pero si al motor, esta corriente durante tiempo prolongados puede arruinar el embobinado.

El otro circuito indispensable para el funcionamiento del motor, el detector de BEMF, pues este le indica al programa cuando conmutar al siguiente paso, ubicado en la

misma PCB del puente trifásico, pero ubicado en su propia sección, permitiendo diferenciar cada circuito y su función.

Con los LEDs en la entrada y salida del puente trifásico se indica el estado y las ordenes enviadas por el microcontrolador, permitiendo observar las secuencias enviadas del microcontrolador para el movimiento del motor.

Se obtuvo un modo de giro lento controlado desde la pantalla táctil. En este modo de operación, el motor gira aproximadamente a 10RPM para poder observar la secuencia de los 6 pasos enviadas al motor.

En las dos pantallas superiores instaladas para mostrar las gráficas es actualmente una función pendiente, por limitantes en el tiempo de lectura analógica de la Raspberry Pi Pico, este provoca graficas con valores erróneos sin poder sincronizarse con el giro del motor, provocando que el programa actual no funcione para graficar, dejando esta función pendiente para una actualización.

Otros resultados fueron:

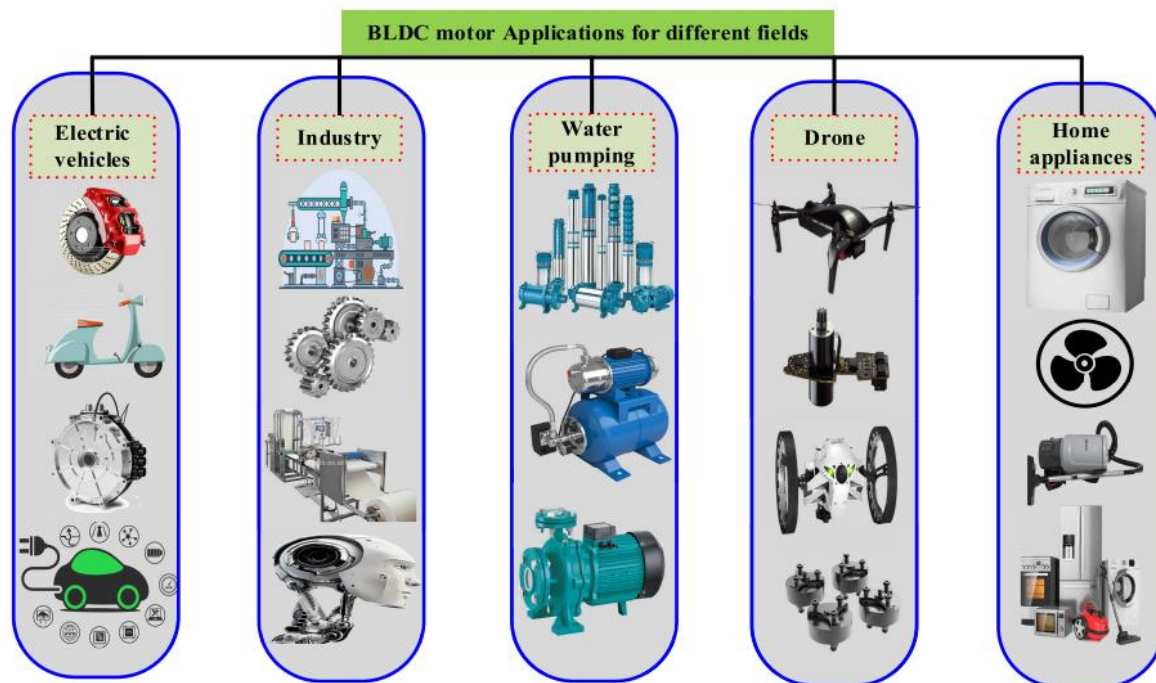
- Un video explicando el funcionamiento básico del motor brushless.
- Una base en donde se instalaron todos los componentes, con un código QR que dirige a una carpeta con el video del funcionamiento básico del motor brushless y el manual.
- El sistema tiene pines disponibles para la conexión de sensores hall, abriendo la posibilidad de controlar motores que necesiten de sensores hall para funcionar.
- Pines para conectar un segundo motor de 12V

Todo lo anteriormente mencionado, forma este sistema controlado para operación de motores brushless orientado a enseñanza/aprendizaje, una herramienta a la introducción de esta tecnología.

6. Conclusiones y recomendaciones:

Figura 19

Aplicaciones del motor brushless en diversos sectores



Tomado de (Mohanraj, 2022).

En base a la información observada en la problemática, los motores brushless son una tecnología ampliamente usada en una variedad de sectores, indicando la relevancia que de por sí ya tienen estos y que esta relevancia va en aumento.

Una tecnología que cada año se vuelve más relevante y se educa poco sobre ella lo que llevo a la pregunta de investigación, ¿Cómo implementar un sistema de aprendizaje sobre los motores brushless para los estudiantes de la facultad de ingeniería electrónica, para que puedan entender el uso y funcionamiento de esta tecnología que posee ventajas sobre otras?

Siendo la respuesta, el sistema desarrollado en este proyecto, uno con el cual el estudiante pueda interactuar y el poder observar los circuitos necesarios para el funcionamiento de un motor brushless sensorless. Un puente trifásico en el que se puede observar sus señales en la entrada y salida gracias a los leds, un circuito detector de BEMF que indica la posición del rotor para realizar los cambios de paso.

El sistema al tener los pines para la conexión de 3 sensores digitales y para conectar un segundo motor de 3 fases, permite expandir el proyecto a una variedad de motores brushless.

Los motores brushless son todos controlados de la misma manera, por conmutación electrónica, el cambio entre la gran variedad de motores brushless es la detección de la posición del rotor para los cambios de pasos, entre estos motores se encuentran los motores pasos a paso que en su mayoría usan sensores hall, todo motor brushless de baja velocidad o gran torque usa sensores para que el programa conozca la posición del rotor.

Esto abre la posibilidad de continuar este proyecto para abarcar una mayor variedad de motores brushless.

7. Bibliografía

- Becerra, O. F. (2011). CONTROL DE MOTORES BRUSHLESS.
- Chambilla, J. (2019). EMBOBINANADO DE UN MOTOR BRUSHLESS.
- Delgado, J. D., & Bolaños, C. J. (2013). CONTROL DE VELOCIDAD PARA MOTOR DC BRUSHLESS SIN SENSORES.
- Grand View Research. (10 de March de 2022). *Global Brushless DC Motor Market Size Report, 2021-2028*. Obtenido de <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/brushless-dc-motors-market>
- Jessica, J. (23 de March de 2022). *Motor DC sin escobillas Mercado Informe Exclusivo / Socios Globales, Nuevas Innovaciones 2022 - Sportlepsia*. Obtenido de <http://www.sportlepsia.com/motor-dc-sin-escobillas-mercado-analisis-de-los-principales-fabricantes-2022/>
- Jimbo Tacurri, J. E. (2015). CARACTERIZACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE UN MOTOR ELÉCTRICO DE CORRIENTE CONTINUA SIN ESCOBILLAS BRUSHLESS CON 1000 WATTS DE POTENCIA.
- Keeping, S. (15 de March de 2022). *Introducción al control del motor CC sin escobillas*. . Obtenido de <https://www.digikey.com/es/articles/an-introduction-to-brushless-dc-motor-control>
- Liébana, D. (2019). Control de motor brushless con dispositivos embebidos.
- Martín, J., & Gastelo, S. (2019). Diseño de controlador de velocidad de motor brushless DC mediante la fuerza contraelectromotriz.
- Mohanraj, D. (2022). A Review of BLDC Motor: State of Art, Advanced Control Techniques, and Applications. *IEEE Access*, 37.
- Mubeen, M. (2008). Brushless DC Motor Primer.
- Murias, D. (1 de April de 2022). *Motores eléctricos: son clave en el desarrollo del coche eléctrico*. . Obtenido de <https://www.motorpasion.com/tecnologia/los-motores-son-tambien-clave-en-el-desarrollo-del-coche-electrico-no-todo-es-cuestion-de-baterias>
- Pascual Vega, A. (2019). Comparativa Entre Motores Brushed y Brushless.
- Rippel, W. (9 de March de 2022). *Induction Versus DC Brushless Motors*. . Obtenido de <https://www.tesla.com/blog/induction-versus-dc-brushless-motors>
- Vargas, A. F. (2019). Motor Brushless.

8. Anexos

Los siguientes anexos se pueden encontrar en el repositorio del trabajo de grado al cual podrás acceder haciendo clic en [este enlace](#).

8.1. Manual:

Documento con la información necesaria para el uso del prototipo y su funcionamiento.

8.2. Video:

Material audiovisual con una explicación del funcionamiento básico de los motores brushless sensorless.

8.3. Artículo:

Texto con la descripción simplificada de todo el proyecto.