



**UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO**

FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPTO. INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

# **“Implementación de un Controlador FOC para Motores Brushless con Encoder Utilizando STM32”**

AUTOR:  
RODRIGO FUENTES PEDREROS

SEMINARIO PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO DE EJECUCIÓN EN ELECTRÓNICA

CONCEPCIÓN – CHILE  
AÑO 2024



**UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO**

FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPTO. INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

## **“Implementación de un Controlador FOC para Motores Brushless con Encoder Utilizando STM32”**

AUTOR

RODRIGO FUENTES PEDREROS

PROFESOR GUÍA:

ANGEL ERNESTO RUBIO

PROFESORES GUÍA ADJUNTO:

PEDRO MELIN COLINA

# Índice

<b>Objetivos</b> . . . . .	<b>5</b>
<b>Resumen</b> . . . . .	<b>6</b>
<b>Introducción</b> . . . . .	<b>7</b>
<b>1 Estado del Arte</b> . . . . .	<b>8</b>
1.1 Control Trapezoidal . . . . .	8
1.2 Fundamentos del Control FOC . . . . .	9
1.2.1 Transformada Clarke . . . . .	9
1.2.2 Transformada Park . . . . .	9
1.2.3 Controladores PI . . . . .	10
1.2.4 Transformada Park Inversa . . . . .	10
1.2.5 Modulacion de Espacio Vectorial . . . . .	10
1.3 Análisis de Proyectos Existentes . . . . .	11
1.3.1 Odrive . . . . .	11
1.3.2 Vesc project . . . . .	11
1.3.3 SimpleFOC . . . . .	12
<b>2 Diseño de Hardware para el Controlador FOC</b> . . . . .	<b>13</b>
2.1 Parametrización del Hardware para el Controlador FOC . . . . .	13
2.1.1 Sensores de Corriente . . . . .	13
2.1.2 Puente MOSFET . . . . .	13
2.2 Implementación del Diseño Electrónico . . . . .	13
<b>3 Configuración del STM32 con STM32CubeMX</b> . . . . .	<b>14</b>
<b>4 Implementación del Algoritmo de Control FOC</b> . . . . .	<b>15</b>
<b>5 Validación y Pruebas de Control FOC</b> . . . . .	<b>16</b>
<b>Comentarios y Conclusiones</b> . . . . .	<b>17</b>
<b>Bibliografía</b> . . . . .	<b>18</b>

<b>Anexos</b> . . . . .	<b>19</b>
Anexo A . . . . .	19

# Objetivos

## Objetivo General

Implementar un controlador de tipo FOC (Control de Campo Orientado) para motores brush-less con encoder, utilizando un microcontrolador STM32, que sirva de base para un driver especializado en la robótica competitiva.

## Objetivos Especificos

- Estudiar los principios del Control de Campo Orientado (FOC) y la modulación de espacio vectorial (SVM) para aplicarlos en el diseño del controlador.
- Diseñar el hardware para el controlador FOC, con los componentes mínimos necesarios para validar el funcionamiento.
- Configurar y programar el microcontrolador para el algoritmo FOC, utilizando las librerías HAL de STM32
- Validar el funcionamiento del controlador y proponer posibles mejoras para su aplicación en robótica competitiva.

# Resumen

# Introducción

## Capítulo 1

# Estado del Arte

### 1.1. Control Trapezoidal

El control trapezoidal, también llamado control de 6 pasos, es sin duda alguna el control más sencillo en términos de complejidad de algoritmo y requerimientos de hardware para el control de motores BLDC.

Este control se basa en seguir una secuencia de 6 pasos. En cada paso de la secuencia se polariza solo uno de los devanados del estator. Es decir, se deja una fase polarizada en positivo, una fase polarizada en negativo y otra fase apagada o en alta impedancia. Esta distribución es la que da origen a los 6 pasos. Cada paso se mantiene por 60 grados de giro y cada fase se mantiene polarizada por 120 grados [1].

Para realizar el cambio de fase, lo más común es el uso de las señales BEMF (Back Electromotive Force o fuerza electromotriz de retorno, por sus siglas en inglés). A esta forma de control trapezoidal se le denomina sensorless o sin sensor. Las señales de BEMF son relativamente sencillas de obtener utilizando una serie de resistencias en estrella para obtener un neutro virtual del bobinado y comparadores de voltaje para la detección del pulso en cada fase [2]. La desventaja es que estos pulsos a bajas velocidades son demasiado tenues para ser detectados, por lo que el motor debe realizar un arranque en lazo abierto para llegar a la velocidad mínima necesaria para tener pulsos de BEMF detectables de forma estable y desde ahí poder hacer el control en lazo cerrado, dando como resultado que estos motores tengan un casi nulo torque para el arranque, además de tiempos de arranque bastante altos [3].

Como solución a esto, se puede agregar el uso de sensores Hall ubicados estratégicamente frente a los imanes del rotor, con el fin de poder identificar en qué paso de la secuencia se encuentra el rotor. A esta configuración se le denomina sensed o con sensor, aunque es posible volver al uso de las señales BEMF después de cierta velocidad, ya que estas señales sufren menos latencia a alta velocidad que los sensores Hall.

De forma opcional, este control puede tener medición de corriente de la fuente de alimentación. Aunque esta medición solo se usa con fines de protección contra sobrecorriente y no tiene ningún efecto sobre el control de lazo cerrado estando dentro del límite establecido.

La mayor desventaja del control trapezoidal es su alto rizado en el torque del motor, lo que da como resultado un motor con baja eficiencia y precisión. Pero su sencillez y bajo coste lo hace ideal para su uso en radio controlados de pequeña escala como drones o autos [4].



## 1.2. Fundamentos del Control FOC

El control FOC es solo uno de los diversos tecnicas de control para motores bruhsless o BLDC, existen otras tecnicas como el control de 6 pasos, que es mas usado en controladors ESC de drones por su simplicidad tando de algoritmo como de hardware, ya que no requiere de un encoder para el feedback de posicion y velocidad ni tampoco requiere estrictamente una medicion de Corriente, aun que los ESC de media-alta gama incorporan medicion de corriente de bus para proteccion del motor. tambien existe el control directo de torque, que es mas comun su uso en motores de media alta potencia, aun que existen algunos trabajos despecto a su aplicacion de motores bruhsless y BLCD, los cuales resaltan su beneficio en timpos de respuesta y mayor simplicidad de algoritmo, no existen placas comersiales que implemente esta estrategia de control para su aplicacion en robotica.

### 1.2.1. Transformada Clarke

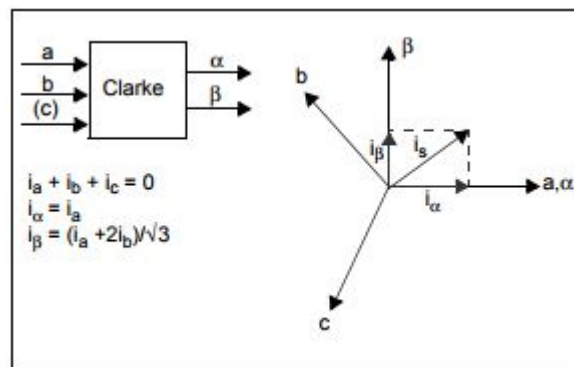


Figura 1.1: Transformada Clarke.

### 1.2.2. Transformada Park

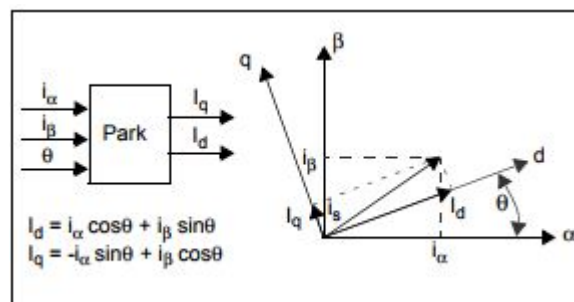


Figura 1.2: Transformada Park.

### 1.2.3. Controladores PI

### 1.2.4. Transformada Park Inversa

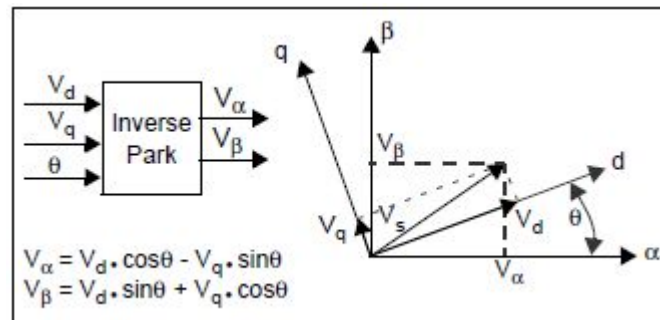


Figura 1.3: Transformada Park Inversa.

### 1.2.5. Modulacion de Espacio Vectorial

## 1.3. Análisis de Proyectos Existentes

### 1.3.1. Odrive

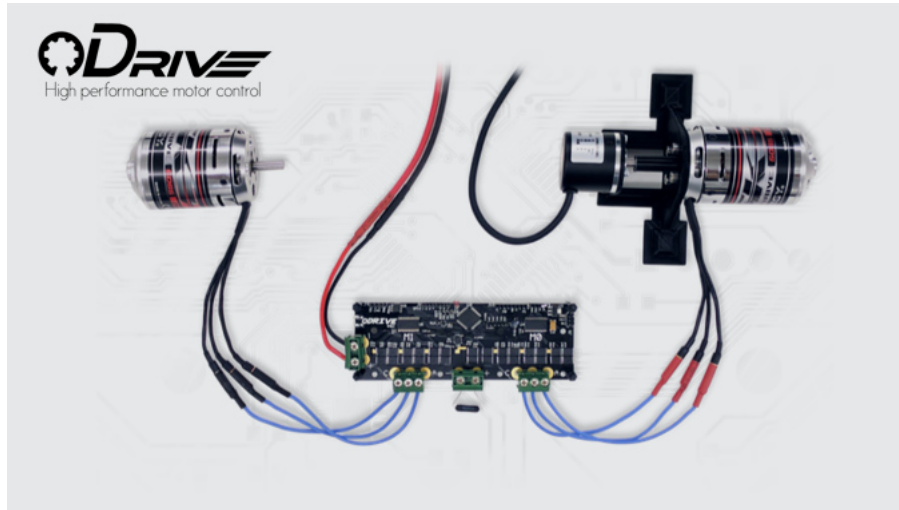


Figura 1.4: Odrive 3.6

Odrive es uno de los controladores FOC comerciales mas populares para su uso en robotica por su gran versatilidad en sus ajustes y un desempeño excelente para la mayoría de usos. internamente tiene opciones para control de torque, velocidad y posicion.

la version mas popular y generalmente usada es Odrive 3.6, puede controlar 2 motores de forma simultanea, con hasta 56V y 70A continuos por motor, su codigo es open source, aun que solo hasta la version 3.5 mantuvo el open hardware, pero actualmente estas versiones estan descontinuadas, ya que el desarrollador esta trabajando en la version Odrive PRO.

aun que Odrive tiene un pequeño problema en su forma de operar internamente y es que su bucle se ejecuta a 8000hz, con un PWM de 24.000hz, esto principalmente limita la electrica maxima que el motor puede controlar a un aproximado de 80.000 ERPM, lo que corresponde a 6 ciclos del bucle por cada giro electronico

### 1.3.2. Vesc project



Figura 1.5: Vesc 6

### 1.3.3. SimpleFOC



Figura 1.6: SimpleFOC

SimpleFOC [5] es una librería Open Source para implementar controladores FOC utilizando arduino IDE o PlatformIO para compilar, este proyecto tiene como foco principal la facilidad de uso, siendo su principal uso en motores de tipo gimbal de baja potencia.

## **Capítulo 2**

# **Diseño de Hardware para el Controlador FOC**

## **2.1. Parametrización del Hardware para el Controlador FOC**

### **2.1.1. Sensores de Corriente**

### **2.1.2. Puente MOSFET**

## **2.2. Implementación del Diseño Electrónico**

## Capítulo 3

# Configuración del STM32 con STM32CubeMX

## Capítulo 4

# Implementación del Algoritmo de Control FOC

## Capítulo 5

# Validación y Pruebas de Control FOC

Este es un documento de ejemplo. Aquí hay una referencia a un libro [6, p 200].

Este es un documento de ejemplo. Aquí hay una referencia a un libro [7, p 200].

Este es un documento de ejemplo. Aquí hay una referencia a un libro [8].



## **Comentarios y Conclusiones**

# Bibliografía

- [1] Patrick Fisher. «High Performance Brushless DC Motor Control». Final year research project report submitted in partial fulfillment of the coursework requirements for the degree of Bachelor of Engineering. Bachelor of Engineering Thesis. School of Engineering & Technology, CQUniversity Australia, mayo de 2014, pág. 3. URL: <https://www.ti.com/lit/an/sprt703/sprt703.pdf>.
- [2] Jianwen Shao. «Direct Back EMF Detection Method for Sensorless Brushless DC (BLDC) Motor Drives». Tesis de mtría. Blacksburg, Virginia: Virginia Polytechnic Institute y State University, 2003, págs. 11-16. URL: <http://educyclopedia.karadimov.info/library/T.pdf>.
- [3] Matias Gualtieri Lara. «Sensorless Brushless DC Motors. Development and comparison of different fault tolerant control algorithms». Relatore: Prof. Paolo Maggiore. Tesi di Laurea Magistrale. Corso di laurea magistrale in Ingegneria Aerospaziale: Politecnico di Torino, mar. de 2018, págs. 26-28. URL: <http://webthesis.biblio.polito.it/id/eprint/6891>.
- [4] Roger Juanpere Tolrà. *Técnicas de control para motores Brushless: Comparativa entre conmutación Trapezoidal, conmutación Sinusoidal y Control Vectorial*. C./Llacuna 162, Barcelona - Spain: ingenia-cat - Motion Control Department. URL: [https://www.motronic.es/upfiles/taller\\_img/files/mantenimiento-y-reparacion-de-servomotores-es\\_2595.pdf](https://www.motronic.es/upfiles/taller_img/files/mantenimiento-y-reparacion-de-servomotores-es_2595.pdf).
- [5] Antun Skuric et al. «SimpleFOC: A Field Oriented Control (FOC) Library for Controlling Brushless Direct Current (BLDC) and Stepper Motors». En: *Journal of Open Source Software* 7.74 (jun. de 2022), pág. 4232. DOI: 10.21105/joss.04232. URL: <https://doi.org/10.21105/joss.04232>.
- [6] Bin Wu. *High-Power Converters and AC Drives*. 1.<sup>a</sup> ed. Hoboken, NJ: Wiley-IEEE Press, 2006, págs. 155-161. ISBN: 978-0471731719. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?bknumber=5237895>.
- [7] Microchip Technology Inc. *Sensored (Encoder-Based) Field Oriented Control of a Three Phase Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM)*. AN2757. Abr. de 2018. URL: <https://www.microchip.com/en-us/application-notes/an2757>.
- [8] Oskar Weigl. *ODrive Firmware*. <https://github.com/odriverobotics/ODrive/blob/fw-v0.5.6/Firmware/MotorControl/utils.cpp>. Función SVM, líneas 10-123, TAG:fw-v0.5.6.

## **Anexo A**