



**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 Fundamentos del Control FOC . . . . .	8
1.1.1 Transformada Clarke . . . . .	8
1.1.2 Transformada Park . . . . .	8
1.1.3 Controladores PI . . . . .	9
1.1.4 Transformada Park Inversa . . . . .	9
1.1.5 Modulación de Espacio Vectorial . . . . .	9
1.2 Análisis de Proyectos Existentes . . . . .	10
1.2.1 Odrive . . . . .	10
1.2.2 Vesc project . . . . .	10
1.2.3 SimpleFOC . . . . .	11
<b>2 Diseño de Hardware para el Controlador FOC</b> . . . . .	<b>12</b>
2.1 Parametrización del Hardware para el Controlador FOC . . . . .	12
2.1.1 Sensores de Corriente . . . . .	12
2.1.2 Puente MOSFET . . . . .	12
2.2 Implementación del Diseño Electrónico . . . . .	12
<b>3 Configuración del STM32 con STM32CubeMX</b> . . . . .	<b>13</b>
<b>4 Implementación del Algoritmo de Control FOC</b> . . . . .	<b>14</b>
<b>5 Validación y Pruebas de Control FOC</b> . . . . .	<b>15</b>
<b>Comentarios y Conclusiones</b> . . . . .	<b>16</b>
<b>Bibliografía</b> . . . . .	<b>17</b>
<b>Anexos</b> . . . . .	<b>18</b>

Anexo A . . . . . 18

# 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. Fundamentos del Control FOC

El control FOC es solo uno de los diversos técnicas de control para motores brushless o BLDC, existen otras técnicas como el control de 6 pasos, que es más usado en controladores ESC de drones por su simplicidad tanto de algoritmo como de hardware, ya que no requiere de un encoder para el feedback de posición y velocidad ni tampoco requiere estrictamente una medición de corriente, aun que los ESC de media-alta gama incorporan medición de corriente de bus para protección del motor. también existe el control directo de torque, que es más común su uso en motores de media alta potencia, aun que existen algunos trabajos respecto a su aplicación de motores brushless y BLDC, los cuales resaltan su beneficio en tiempos de respuesta y mayor simplicidad de algoritmo, no existen placas comerciales que implemente esta estrategia de control para su aplicación en robótica.

#### 1.1.1. Transformada Clarke

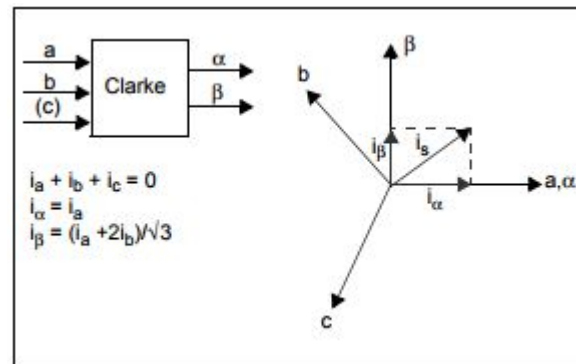


Figura 1.1: Transformada Clarke.

#### 1.1.2. Transformada Park



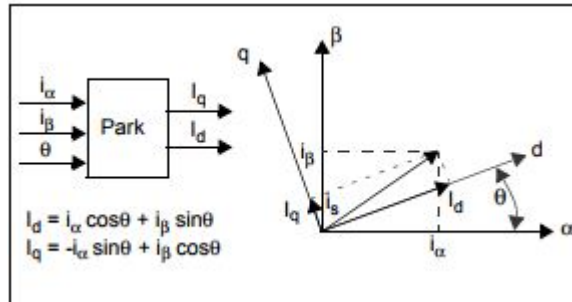


Figura 1.2: Transformada Park.

### 1.1.3. Controladores PI

### 1.1.4. Transformada Park Inversa

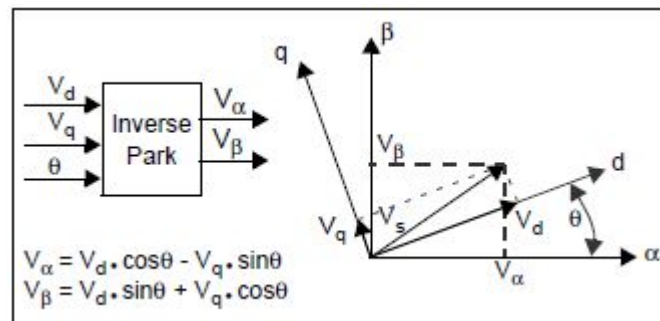


Figura 1.3: Transformada Park Inversa.

### 1.1.5. Modulacion de Espacio Vectorial

## 1.2. Análisis de Proyectos Existentes

### 1.2.1. Odrive

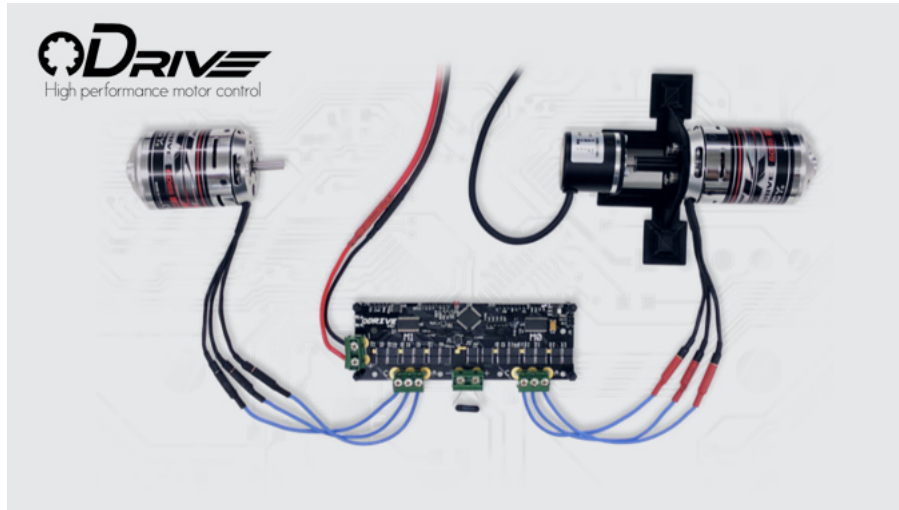


Figura 1.4: Odrive 3.6

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

### 1.2.2. Vesc project



Figura 1.5: Vesc 6

### 1.2.3. SimpleFOC



Figura 1.6: SimpleFOC

SimpleFOC [1] 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 [2].

Este es un documento de ejemplo. Aquí hay una referencia a un libro [3].

Este es un documento de ejemplo. Aquí hay una referencia a un libro [4].

## **Comentarios y Conclusiones**



# Bibliografía

- [1] 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>.
- [2] 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>.
- [3] Microchip Technology Inc. *Sensored (Encoder-Based) Field Oriented Control of a Three Phase Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM)*. AN2757. Abr. de 2018, págs. 155-161. URL: <https://www.microchip.com/en-us/application-notes/an2757>.
- [4] 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**