



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

CONTROL FOC DE MOTORES BLDC

TRABAJO FINAL DEL

Grado en Ingeniería Eléctrica

REALIZADO POR

SERGIO CIFRE GREGORIO

TUTORIZADO POR

FRANCISCO RODRÍGUEZ BALLESTER

CURSO ACADÉMICO: 2019/2020

ÍNDICE DE CONTENIDOS:

ÍNDICE DE FIGURAS	5
ÍNDICE DE TABLAS	7
ÍNDICE DE ACRÓNIMOS	8
I. MEMORIA	9
RESUMEN.....	11
RESUM.....	12
ABSTRACT	13
1. OBJETIVOS.....	14
2. LOS MOTORES BLDC.....	15
2.1. MAGNETISMO.	16
2.1.1. POLOS MAGNÉTICOS.....	16
2.1.2. INDUCCIÓN MAGNÉTICA.....	17
2.1.3. LEY DE BIOT-SAVART	18
2.1.4. LA LEY DE LAPLACE	20
2.2. ¿POR QUÉ MOTORES DE CORRIENTE CONTINUA?	21
2.3. DESARROLLO CONSTRUCTIVO DE LOS MOTORES BLDC.....	21
2.3.1. ESTATOR	22
2.3.2. ROTOR	24
2.3.3. RELACIÓN BOBINAS (RANURAS) VS. POLOS.....	25
2.3.4. INRUNNER VS. OUTRUNNER	26
2.4. CARACTERÍSTICA KV DEL MOTOR.	31
2.5. ELECTRONIC SPEED CONTROLLER.	33
2.6. APLICACIONES DE LOS MOTORES BLDC.....	36
2.7. MOTORES BLDC VS. MOTOR SÍNCRONO, ASÍNCRONO Y DC.	37
2.7.1. MOTOR BLDC VS. MOTOR SINCRÓNICO DE IMANES PERMANENTES.....	37
2.7.2. MOTOR BLDC VS. MOTOR ASÍNCRONO.	39
2.7.3. MOTOR BLDC VS. MOTOR DC.	40
3. EL CONTROL FOC (FIELD ORIENTED CONTROL).	42
3.1. LOS PRINCIPIOS DEL FOC. TRANSFORMACIÓN DE COORDENADAS.....	44
3.1.1. TRANSFORMADA DE CLARKE.	44
3.1.2. TRANSFORMADA DE PARK.	45
3.1.3. EL CONTROL PI.	45
3.1.4. TRANSFORMADA INVERSA DE PARK	47
3.1.5. TRANSFORMADA INVERSA DE CLARKE.	47
3.1.6. SVM O SVPWM. MODULACIÓN ESPACIO VECTORIAL.....	48
3.2. CONTROL FOC DIRECTO E INDIRECTO.	49

3.2.1. MEDICIÓN DE POSICIÓN.....	50
3.3. CONTROL FOC SIN SENSORES.	51
3.3.1. MODELO DEL MOTOR.....	52
3.4. DEBILITAMIENTO DE CAMPO.....	54
3.5. MODO DE FUNCIONAMIENTO.	55
3.5.1. MODO DE VELOCIDAD.....	55
3.5.2. MODO DE PAR.....	55
3.6. ARRANQUE DEL MOTOR.	55
3.7. APLICACIONES DEL CONTROL FOC.	56
4. CONTROL FOC PARA UN MOTOR BLDC.	57
4.1. DESCRIPCIÓN DEL HARDWARE.	58
4.1.1. MICROCONTROLADOR STM32F302R8.....	58
4.1.2. X-NUCLEO-IHM07M1.	59
4.1.3. FUENTE DE ALIMENTACIÓN.	59
4.1.4. MOTOR BULLRUNNING BR2804-1700kv ¹	60
4.2. DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE.....	61
4.2.1. MOTOR PROFILER.....	61
4.2.2. ST MOTOR CONTROL WORKBENCH.....	65
4.2.3. STM32CubeMX.....	69
4.2.4. IAR EMBEDDED WORKBENCH.	72
4.3. EXPOSICIÓN DE PRUEBAS Y RESULTADOS.	73
4.3.1. HERRAMIENTAS DE PRUEBAS.	73
4.3.2. PRUEBAS EMPÍRICAS DEL CONTROL PI.	76
4.3.3. RAMPAS DE VELOCIDAD.....	81
5. CONCLUSIONES.....	84
II. PRESUPUESTO	86
6. DESCRIPCIÓN DEL PRESUPUESTO.	87
7. COSTE DE LOS MATERIALES.....	88
8. COSTE DE LA MANO DE OBRA.	88
9. COSTE FINAL DEL PROYECTO.	88
III. PLIEGO DE CONDICIONES	90
10. DEFINICIÓN Y ALCANCE DEL PLIEGO.	91
11. CONDICIONES Y NORMAS DE CARÁCTER GENERAL.	91
11.1. INSTALACIÓN.	91
11.2. SEGURIDAD.....	91

11.3.	UTILIZACIÓN.....	92
11.4.	MANTENIMIENTO.....	92
12.	CONDICIONES PARTICULARES.....	92
12.1.	TECNICAS.....	92
12.1.1.	P-NUCLEO-IHM001.....	92
12.1.2.	MOTOR BULLRUNNING BR2804-1700KV ⁻¹	93
IV.	ANEXOS.....	94
13.	ANEXO 1.....	96
V.	BIBLIOGRAFÍA.....	125
14.	BIBLIOGRAFÍA.....	127

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: ATRACCIÓN Y REPULSIÓN ENTRE POLOS. FUENTE: MONOLITHICPOWER.	17
FIGURA 2: LEY DE BIOT-SAVART. FUENTE: PHYS.LIBRETEXTS.ORG	19
FIGURA 3: REGLA DE FLEMING DE LA MANO IZQUIERDA. FUENTE: ELECTRICAL4YOU	21
FIGURA 4: DETALLE DE LAS PARTES DEL MOTOR BLDC. FUENTE: HowToMECHATRONICS.	22
FIGURA 5: CONFIGURACIÓN EN ESTRELLA (STAR) DE LOS BOBINADOS DE UN MOTOR. FUENTE: E-RADIOCONTROL.COM.	23
FIGURA 6: FUERZA CONTRAELECTROMOTRIZ DE FORMA TRAPEZOIDAL PRODUCIDA POR UN BLDC. FUENTE: MICROCHIP.	23
FIGURA 7: DISPOSICIÓN DE LOS IMANES: EN SUPERFICIE, ENTERRADOS Y ENCASTRADOS. FUENTE: MICROCHIP.	25
FIGURA 8: DETALLE DEL ESTATOR DE UN MOTOR BRUSHLESS INRUNNER. FUENTE: MICROCHIP.	27
FIGURA 9: DETALLE DEL ESTATOR (DERECHA) CON BOBINADO CONCENTRADO Y DEL ROTOR (IZQUIERDA) DE UN MOTOR OUTRUNNER. FUENTE: ARCHIVO DEL AUTOR.	28
FIGURA 10: MOTOR BRUSHLESS OUTRUNNER BR2804-1700Kv. FUENTE: ARCHIVO DEL AUTOR.	29
FIGURA 11: MOTOR BRUSHLESS INRUNNER TURNIGY XK2845-3650KV. FUENTE: HOBBYKING.COM	29
FIGURA 12: CIRCUITO EQUIVALENTE MOTOR BRUSHLESS.	32
FIGURA 13: CARACTERÍSTICA PAR/VELOCIDAD MOTOR BRUSHLESS. FUENTE: MICROCHIP.	33
FIGURA 14: CONMUTACIÓN DE LOS MOSFET EN UN MOTOR BLDC. FUENTE: HowToMECHATRONICS.	34
FIGURA 15: ESQUEMA FUNCIONAL DEL CIRCUITO ESC. FUENTE: MICROCHIP.	35
FIGURA 16: PROCESO DE CONMUTACIÓN (ENERGIZACIÓN) DE LOS BOBINADOS DEL MOTOR. FUENTE: MICROCHIP.	36
FIGURA 17: TRANSFORMACIONES QUE SE LLEVAN A CABO EN EL CONTROL FOC. FUENTE: E-PUBLICATIONS@MARQUETTE.	42
FIGURA 18: ANALOGÍA ENTRE EL CONTROL DE UNA MÁQUINA AC (P.EJEM. ACIM) Y EL CONTROL DE UNA MÁQUINA DC. FUENTE: MÁQUINAS ELÉCTRICAS: TÉCNICAS MODERNAS DE CONTROL.	43
FIGURA 19: TRANSFORMACIÓN DE CLARKE. FUENTE: MICROCHIP.	44
FIGURA 20: TRANSFORMADA DE PARK. FUENTE: MICROCHIP.	45
FIGURA 21: REPRESENTACIÓN DE UN SISTEMA EN LAZO CERRADO. FUENTE: TECINGENIERIACLASICO.BLOGSPOT.COM.	46
FIGURA 22: TRANSFORMADA INVERSA DE PARK. FUENTE: MICROCHIP.	47
FIGURA 23: TRANSFORMADA INVERSA DE CLARKE. FUENTE: MICROCHIP.	48
FIGURA 24: REPRESENTACIÓN ESPACIAL DE LOS 6 VECTORES + 2 VECTORES NULOS. FUENTE: MICROCHIP.	48
FIGURA 25: COMPOSICIÓN VECTORIAL. FUENTE: MICROCHIP.	49
FIGURA 26: DIAGRAMA DE BLOQUES DEL CONTROL FOC CON SENsoRES DE UN PMSM. FUENTE: MICROCHIP. (30)	50
FIGURA 27: TRENA DE PULSOS GENERADO POR EL ENCODER DE UN MOTOR. FUENTE: MICROCHIP.	51
FIGURA 28: MODELO DEL MOTOR BLDC. FUENTE: MICROCHIP.	52
FIGURA 29: SEÑALES DE SENsoRES DE EFECTO HALL Y SEÑALES PRODUCIDAS POR LA F.C.E.M. FUENTE: RESEARCHGATE.	54
FIGURA 30: CURVA DE DEBILITAMIENTO DE CAMPO. FUENTE: MICROCHIP.	55
FIGURA 31: DIAGRAMA DE BLOQUES DEL ARRANQUE DE UN MOTOR PMSM. FUENTE: MICROCHIP.	56
FIGURA 32: KIT DE DESARROLLO DE CONTROL FOC Y 6 STEPS. FUENTE: ST.COM	57
FIGURA 33: MICROCONTROLADOR STM32F302R8. FUENTE: ARCHIVO DEL AUTOR.	58
FIGURA 34: SHIELD DE POTENCIA X-NUCLEO-IHM07M1. FUENTE: ARCHIVO DEL AUTOR.	59
FIGURA 35: DISPOSICIÓN DEL KIT DE CONTROL. FUENTE: ARCHIVO DEL AUTOR.	60
FIGURA 36: INTERFAZ DEL PROGRAMA MOTOR PROFILER. FUENTE: MOTOR PROFILER, AUTOR.	61
FIGURA 37: RESULTADO DEL ENSAYO DEL MOTOR CON EL MOTOR PROFILER. FUENTE: MOTOR PROFILER, AUTOR.	62
FIGURA 38: CONSOLA DE CONTROL INTEGRADA EN MOTOR PROFILER. FUENTE: MOTOR PROFILER, AUTOR.	65
FIGURA 39: INTERFAZ DEL PROGRAMA MC WORKBENCH. FUENTE: ST MC WORKBENCH, AUTOR.	66
FIGURA 40: PARÁMETROS DE ENTRADA DEL PROGRAMA A INDICAR POR EL USUARIO. FUENTE: ST MC WORKBENCH, AUTOR.	67
FIGURA 41: INTERFAZ PRINCIPAL DEL PROGRAMA MC WORKBENCH. FUENTE: ST MC WORKBENCH, AUTOR.	68
FIGURA 42: PARÁMETROS DEL MOTOR. FUENTE: ST MC WORKBENCH, AUTOR.	68
FIGURA 43: EXPORTAR EL PROYECTO PARA PODER TRABAJAR EN STM32CUBEMX. FUENTE: STM32CUBEMX, AUTOR.	69
FIGURA 44: INTERFAZ DEL PROGRAMA STM32CUBEMX. FUENTE: STM32CUBEMX, AUTOR.	70
FIGURA 45: PINES EN USO EN NUESTRO MICROCONTROLADOR. FUENTE: STM32CUBEMX, AUTOR.	70
FIGURA 46: NVIC. FUENTE: STM32CUBEMX, AUTOR.	71

FIGURA 47: OPCIONES EN LA GENERACIÓN DE CODIGO. FUENTE: STM32CUBE MX, AUTOR.	72
FIGURA 48: DESCARGA DE LA APLICACIÓN EN LA PLACA. FUENTE: IAR EMBEDDED WORKBENCH, AUTOR.	73
FIGURA 49: INTERFAZ BÁSICA DE CONTROL DEL MOTOR. FUENTE: ST MC WORKBENCH, AUTOR.	74
FIGURA 50: INTERFAZ AVANZADA DE CONTROL DEL MOTOR. FUENTE: ST MC WORKBENCH, AUTOR.	75
FIGURA 51: PESTAÑA DE CONFIGURACIÓN. FUENTE: ST MC WORKBENCH, AUTOR.	75
FIGURA 52: SOBREOSCILACIÓN EN LA VELOCIDAD DEL MOTOR. FUENTE: ST MC WORKBENCH, AUTOR.	76
FIGURA 53: GRÁFICA DE VELOCIDAD CON $K_p = 1000$ Y $K_i = 0$. FUENTE: ST MC WORKBENCH, AUTOR.	77
FIGURA 54: GRÁFICA DE VELOCIDAD CON $K_p = 3800$ Y $K_i = 0$. FUENTE: ST MC WORKBENCH, AUTOR.	78
FIGURA 55: SOBREOSCILACIÓN PRODUCIDA POR UN VALOR MUY ELEVADO DE K_p . FUENTE: ST MC WORKBENCH, AUTOR.	78
FIGURA 56: GRÁFICA DE VELOCIDAD CON $K_p = 3800$ Y $K_i = 100$. FUENTE: ST MC WORKBENCH, AUTOR.	79
FIGURA 57: GRÁFICA DE VELOCIDAD CON $K_p = 3800$ Y $K_i = 1000$. FUENTE: ST MC WORKBENCH, AUTOR.	80
FIGURA 58: GRÁFICA DE VELOCIDAD CON $K_p = 7100$ Y $K_i = 8000$. FUENTE: ST MC WORKBENCH, AUTOR.	81
FIGURA 59: RAMPA DE ACCELERACIÓN 1. FUENTE: ST MC WORKBENCH, AUTOR.	82
FIGURA 60: RAMPA DE DECELERACIÓN 2. FUENTE: ST MC WORKBENCH, AUTOR.	83
FIGURA 61: RAMPA DE ACCELERACIÓN 3. FUENTE: ST MC WORKBENCH, AUTOR.	83
FIGURA 62: RAMPA DE DECELERACIÓN 4. FUENTE: ST MC WORKBENCH, AUTOR.	84

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1: VALORES FACTOR DE BOBINADO SEGÚN NÚMERO DE BOBINAS Y POLOS.	26
TABLA 2: COMPARATIVA ENTRE EL MOTOR PMSM Y EL BLDC.	39
TABLA 3: COMPARACIÓN ENTRE EL MOTOR DE INDUCCIÓN Y EL MOTOR BLDC.	40
TABLA 4: COMPARACIÓN ENTRE EL MOTOR DC (CON ESCOBILLAS) Y EL MOTOR BRUSHLESS.	42
TABLA 5: POSIBLES ESTADOS DEL INVERSOR EN LA MODULACIÓN SVPWM. FUENTE: MICROCHIP. (29)	49
TABLA 6: CARACTERÍSTICAS DEL MOTOR BR-2804.	60
TABLA 7: PARÁMETROS ELÉCTRICOS OBTENIDOS MEDIANTE LA REALIZACIÓN DE MÚLTIPLES ENSAYOS. FUENTE: MOTOR PROFILER, AUTOR.	62
TABLA 8: PARÁMETROS MECÁNICOS OBTENIDOS MEDIANTE LA REALIZACIÓN DE MÚLTIPLES ENSAYOS. FUENTE: MOTOR PROFILER, AUTOR.	63
TABLA 9: VALORES ELÉCTRICOS PROPORCIONADOS POR ST. FUENTE: ST MC WORKBENCH.	63
TABLA 10: VALORES MECÁNICOS PROPORCIONADOS POR ST. FUENTE: ST MC WORKBENCH.	64
TABLA 11: PARÁMETROS ELÉCTRICO CON VALORES DE ENTRADA SIMILARES A LOS DE ST. FUENTE: MOTOR PROFILER.	64
TABLA 12: PARÁMETROS MECÁNICO CON VALORES DE ENTRADA SIMILARES A LOS DE ST. FUENTE: MOTOR PROFILER.	64
TABLA 13: VALORES INICIALES DE LAS GANANCIAS DEL CONTROL PI. FUENTE: ST MC WORKBENCH, AUTOR.	76
TABLA 14: VALORES DE LA PRIMERA PRUEBA DEL CONTROL PI. FUENTE: ST MC WORKBENCH, AUTOR.	77
TABLA 15: VALORES DE PRUEBA DEL CONTROL PI. FUENTE: ST MC WORKBENCH, AUTOR.	79
TABLA 16: VALORES DE PRUEBA DEL CONTROL PI. FUENTE: ST MC WORKBENCH, AUTOR.	80
TABLA 17: TABLA 16: VALORES DE LA ÚLTIMA PRUEBA DEL CONTROL PI. FUENTE: ST MC WORKBENCH, AUTOR.	81
TABLA 18: VALORES CARACTERÍSTICOS DE LAS RAMPAS. FUENTE: AUTOR.	82
TABLA 19: TABLA CON LOS COSTES DE LOS MATERIALES. FUENTE: AUTOR.	88
TABLA 20: TABLA CON LOS COSTES DE INGENIERÍA. FUENTE: AUTOR.	88
TABLA 21: TABLA CON LOS COSTES FINALES DEL PROYECTO. FUENTE: AUTOR.	89
TABLA 22:PLACA DE CARACTERÍSTICAS DEL MOTOR. FUENTE: AUTOR.	93

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

DC – *Direct Current*. Corriente continua.

AC – *Altern Current*. Corriente alterna.

BLDC – *Brushless Direct Current (Motor)*. Motor de corriente continua sin escobillas.

FOC – *Field Oriented Control*. Control orientado de campo o control vectorial.

ESC – *Electronic Speed Controller*. Controlador electrónico de velocidad.

PMSM – *Permanent Magnets Synchronous Motor*. Motor síncrono de imanes permanentes.

ACIM – *Altern Current Induction Motor*. Motor de inducción o motor asíncrono.

PWM – *Pulse Width Modulation*. Modulación por ancho de pulso.

SVPWM – *Space Vector PWM*. Modulación por ancho de pulsos espacio vectorial.



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

I. MEMORIA

TRABAJO FINAL DEL

Grado en Ingeniería Eléctrica

REALIZADO POR

SERGIO CIFRE GREGORIO

TUTORIZADO POR

FRANCISCO RODRÍGUEZ BALLESTER

CURSO ACADÉMICO: 2019/2020

RESUMEN

El presente documento lo encontramos dividido en tres partes principales donde se tratan los diferentes temas y conceptos que abarca el proyecto.

En primer lugar, se presentan los motores que intervienen en el trabajo. Se exponen y explican los conceptos básicos de los motores BLDC o brushless.

En la segunda parte entramos en el control orientado de campo (FOC, por sus siglas en inglés) o control vectorial. Se desarrollan los procesos o pasos a seguir para la realización de dicho control de manera básica a modo de poder entender su funcionamiento.

Y en último lugar, se exponen los ensayos llevados a cabo gracias al kit de control de STMicroelectronics. Con este equipo se ha realizado el control vectorial de velocidad y se han obtenido y presentado gráficas que expresan de manera clara el comportamiento del motor ante diferentes peticiones de velocidad.

RESUM

El present document el trobem dividit en tres parts principals on es tracten els diferents temes i conceptes que abasta el projecte.

En primer lloc, es presenten els motors que intervenen en el treball. S'exposen i expliquen els conceptes bàsics dels motors BLDC o brushless.

En la segona part entrem en el control orientat de camp (FOC, per les seues sigles en anglés) o control vectorial. Es desenvolupen els processos o passos a seguir per a la realització d'aquest control de manera bàsica a manera de poder entendre el seu funcionament.

I en últim lloc, s'exposen els assajos duts a terme gràcies al kit de control de STMicroelectronics. Amb aquest equip s'ha realitzat el control vectorial de velocitat i s'han obtingut i presentat gràfiques que expressen de manera clara el comportament del motor davant diferents peticions de velocitat.

ABSTRACT

The present document is divided into three main parts where the different themes and concepts covered by the project are discussed.

Firstly, the motors involved in the work are presented. The basic concepts of the BLDC or brushless motors are presented and explained.

In the second part we enter on the field oriented control (FOC) or vector control. We develop the processes or steps to follow to carry out this control in a basic way in order to understand its operation.

And lastly, the tests carried out thanks to the STMicroelectronics control kit are presented. With this equipment, the vector speed control has been carried out and graphs have been obtained and presented which clearly express the behaviour of the motor when faced with different speed requests.

1. OBJETIVOS.

Los objetivos que vamos a abordar mediante la realización de este proyecto podemos dividirlos en tres secciones principales. En primer lugar, se busca explicar y desarrollar el concepto y funcionamiento de los motores BLDC, ampliando así los tipos de motores vistos en las asignaturas de máquinas eléctricas. Para ello, se exponen de manera breve los principios básicos y leyes del electromagnetismo necesarios para su posterior comprensión.

Cabe destacar que el electromagnetismo no es el objeto de estudio del presente documento, ya que si así fuera abarcaría varios libros estudiarlo con detenimiento. Como se verá en los apartados pertinentes, las fórmulas han sido tomadas de los libros que en la bibliografía se indican, evitando así su desarrollo matemático.

Veremos de manera detallada las partes que conforman el motor, como es el estator, que como se intuye es la parte estática de la máquina y sobre la cual va montado el bobinado. El rotor, parte que gira sobre su eje longitudinal sobre el cual van montados los imanes permanentes. También trataremos los diferentes tipos de motores según sus tipologías constructivas, y acompañando a todo esto, se incluirán planos y diagramas para facilitar la comprensión de la estructura de la máquina en cada caso.

A continuación, veremos cómo se excitan los bobinados del motor para su correcto funcionamiento, teniendo en cuenta el circuito pertinente para ello, el ESC (*Electronic Speed Controller*). Entraremos en contacto con ciertos detalles del citado circuito, así como también se presentará un esquema eléctrico básico para entender de manera más clara la composición de este.

Una vez vistos los detalles constructivos y funcionales de esta máquina se expondrán las ventajas e inconvenientes que nos ofrece. Se realizará una comparación entre el motor que nos trae este documento y algunas de las máquinas más comunes que podemos encontrar en la industria o en la vida cotidiana, como pueden ser el motor sincrónico de imanes permanentes (PMSM), el motor asíncrono o de inducción y el motor convencional de corriente continua (brushed DC motor).

En segundo lugar, se revisará y ampliará el control FOC (Field Oriented Control), visto en la asignatura de máquinas eléctricas, como método de regulación de los motores BLDC. Se realizará un estudio teórico de lo que supone el control orientado de campo (FOC), la manera más eficiente de controlar una máquina eléctrica (1) y de los conceptos que con este tipo de control están relacionados.

Por último, se pondrá en práctica los conceptos estudiados previamente con ayuda del kit de desarrollo STM32 Núcleo del control FOC de un pequeño motor BLDC. Dicho kit cuenta con una parte de control, la placa NUCLEO F302R8 y una placa de potencia, la X-NUCLEO-IHM07M1. En el anexo que encontramos al final del documento se puede observar el esquema eléctrico de la placa y sus principales componentes y/o características. Además, antes de proceder con el control estudiaremos de manera detallada nuestro motor en particular, indicando sus propiedades físicas como tamaño, número de bobinas, etc. así como sus características eléctricas, por ejemplo, como la tensión de trabajo.

El objetivo final de este proyecto es el de llevar a cabo el control sobre un motor brushless mediante el algoritmo proporcionado por ST modificando los parámetros del control PI y

observando cómo estos influyen en el comportamiento del motor ante las diferentes consignas de velocidad y rampas de aceleración y deceleración. Para ello se expondrán los resultados obtenidos ante las diferentes consignas de velocidad planteadas y se presentará las gráficas de velocidad obtenidas por medio del plotter del programa de control pertinente y las conclusiones extraídas de las pruebas realizadas.

2. LOS MOTORES BLDC.

Las máquinas eléctricas se han convertido en una de las piezas que han servido como pilares fundamentales para el desarrollo del ser humano. Allá donde miremos, podemos encontrar diferentes tipos de motores (o generadores) eléctricos realizando gran variedad de funciones. Desde una situación cotidiana como es poner la lavadora y que un pequeño motor sea el que se encargue del centrifugado hasta los grandes motores/generadores de las centrales de bombeo que abastecen a cientos de miles de hogares con electricidad, los motores nos han acompañado desde su invención contribuyendo a la mejora de nuestra calidad de vida y a la obtención de un mayor grado de comodidad. Además, cabe decir que, sin ellos, la industria y nuestra forma de vida no serían en ningún aspecto tal y como las conocemos hoy en día. Por tanto, podemos afirmar sin ninguna duda que estas máquinas suponen una parte indispensable de nuestra realidad en el día a día.

Cada vez con mayor frecuencia vemos diferentes vehículos o elementos de recreo que cuentan, en especial, con el tipo de motores que se tratan en este documento. Por ejemplo, los patinetes eléctricos, vehículos que están contribuyendo a la mejora de la movilidad de las personas y, sobre todo, a fomentar un transporte más limpio. Estos dispositivos cuentan con un motor BLDC insertado en su rueda delantera, un motor que, como explicaremos más adelante, es un tipo de motor brushless conocido como outrunner. Un beneficio con el que cuenta este vehículo al usar esta máquina es el bajo mantenimiento que el motor necesita debido a la ausencia de escobillas. Esto deriva en que podemos realizar un uso más prolongado sin necesidad de desmontar la rueda para reparar el motor o simplemente para hacer un mantenimiento preventivo del vehículo.

Ya sea un patinete o un vehículo de mayores prestaciones como una motocicleta, los BLDC se presentan como los motores idóneos para estas aplicaciones donde la fuente de alimentación de estas máquinas son baterías.

Otro ejemplo que cada día resulta más común son los drones. Estos aparatos usan (en la mayoría de los casos) como método de propulsión los motores BLDC debido a su buena relación entre el peso, el tamaño y su potencia. (2)

Los drones son un tipo de UAV (Unmanned Aerial Vehicle), un vehículo aéreo no tripulado que cada vez tiene una mayor aceptación en cuanto a su uso por la sociedad, donde podemos encontrar múltiples ejemplos. Tienen aplicaciones militares en las cuales son usados como vehículos espía, o aplicaciones policiales donde se usan para ayudar a la vigilancia en eventos multitudinarios o en carreteras. También son usados para la vigilancia de bosques y como método de prevención de grandes incendios o para la vigilancia de playas evitando ahogamientos por la rápida respuesta de los socorristas que usan estos aparatos. Y, actualmente, cada vez con mayor frecuencia, son incluso construidos por piezas por parte de

aficionados a los drones, lo que hace que estos aparatos sean cada vez más accesibles para cualquier persona y, con ellos, los motores BLDC.

Es en parte debido a este uso cada vez más cotidiano, pero a su vez también industrial, que se ha creído interesante realizar un estudio de los motores BLDC con la intención de que el lector conozca de manera más cercana y familiar los principios de dichas máquinas.

2.1. MAGNETISMO.

Como decíamos anteriormente, vamos a exponer de manera breve algunos conceptos sobre magnetismo necesarios para el entendimiento del funcionamiento del motor.

Los polos magnéticos o imanes, presentes en nuestro caso en el rotor y responsables de la inducción magnética. La inducción magnética, responsable de la aparición de una fuerza capaz de hacer rotar el eje de la máquina. La ley de Biot Savart, con la que se puede calcular la inducción producida por las bobinas de los motores. La primera ley de Laplace, que relaciona la fuerza magnética en función de la inducción y la corriente eléctrica y, finalmente, la regla de Fleming de la mano izquierda, con la que podemos conocer el sentido de la fuerza en función de la inducción producida por los imanes permanentes del rotor y las corrientes de las bobinas del estator.

Los motores eléctricos convierten la energía eléctrica en energía mecánica y los generadores, por el contrario, transforman la energía mecánica de entrada en energía eléctrica. Esta transformación la hacen mediante los campos electromagnéticos que en la máquina se producen. Y mediante el estudio y el entendimiento de los principios electromagnéticos somos capaces de construir cada día máquinas más avanzadas y eficientes.

Independientemente del tipo de motor, ya sea AC (inducción, sincrónico, etc.) o de DC (brushed, brushless, etc.) todos los motores siguen el mismo principio de funcionamiento. Y para entender dicho funcionamiento vamos a ver los diferentes conceptos y fórmulas que lo respaldan.

2.1.1. POLOS MAGNÉTICOS.

Como ya sabemos, los imanes cuentan con dos polos, el polo norte y el polo sur. Estos, generan unas líneas de campo, también conocidas como líneas de fuerza magnética que fluyen desde el polo norte al polo sur. El fenómeno de las líneas de campo se explica mediante la Ley de Gauss para el campo magnético. Esta ley, dada por:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

Lo que viene a decir que la divergencia del campo magnético es igual a 0. Es decir, no hay fuentes del campo magnético, toda línea de fuerza va y vuelve y se cierra sobre sí misma (3). Y es debido a esta fuerza magnética que los polos iguales se repelen y los polos diferentes se atraen. (Figura 1).

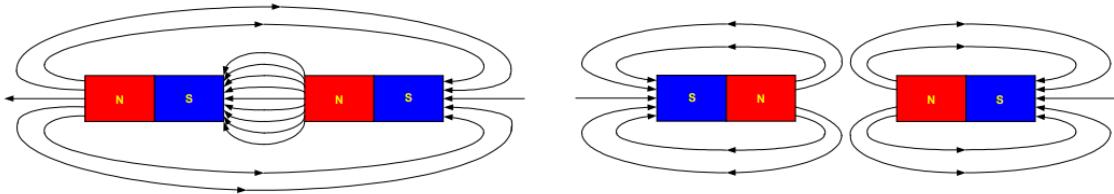


Figura 1: Atracción y repulsión entre polos. Fuente: MonolithicPower.

Como curiosidad podemos decir que las brújulas funcionan mediante este fenómeno, sin embargo, el polo norte de una brújula es atraído por el polo Norte terrestre y el sur por el polo Sur. Esto es debido a que el polo Norte terrestre es en realidad el polo sur magnético y viceversa.

Y en cuanto a los motores, es mediante esta atracción y repulsión por la cual se produce la rotación del eje de la máquina. Es decir, el estator produce un campo magnético que bien atrae o bien repele al campo magnético producido por el rotor y, de esta manera se produce el movimiento del motor.

Según la construcción de cada motor, los campos magnéticos del rotor y del estator son producidos bien por un bobinado, es decir, el motor funciona mediante la excitación de electroimanes, o bien esta excitación se produce por imanes permanentes montados en el motor. Esta última disposición es la que corresponde al caso que nos ataña, donde vamos a encontrar los imanes situados en el rotor. Sin embargo, explicaremos más detalladamente la construcción del motor en la sección pertinente.

Como ejemplo del primer caso, podemos citar las máquinas sincrónicas dotadas de núcleos magnéticos en el rotor sobre los cuales van montadas las bobinas por las que circula corriente continua para crear el inductor. Aunque cabe destacar que también podemos encontrar máquinas sincrónicas con imanes permanentes montados en el rotor (PMSM, Permanent Magnets Synchronous Motor) con los que producen la inducción necesaria para su funcionamiento.

2.1.2. INDUCCIÓN MAGNÉTICA

Una carga eléctrica q en movimiento genera un campo magnético. Si dicha carga se mueve con una velocidad \vec{v} en el interior de un campo magnético, esta experimentará una fuerza \vec{F} que será perpendicular a la dirección de \vec{v} . Dicha fuerza es perpendicular a la inducción magnética \vec{B} , y vendrá expresada en función de esta última mediante la fórmula de Lorentz:

$$\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B}) \text{ (N)}$$

Si además existe un campo eléctrico, dicha carga experimentará una fuerza de acuerdo con:

$$\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B}) + q \cdot \vec{E} \text{ (N)}$$

Ecuación que toma el nombre de fuerza de Lorentz (4).

La unidad de medida de la inducción magnética en el sistema internacional es el Tesla, y según lo extraído del libro “Fundamentos electromagnéticos para la ingeniería” esta unidad se define como “El Tesla (T) es el valor de la densidad de flujo magnético que produce una fuerza de un newton sobre una carga de un coulomb que se mueve perpendicularmente al campo con una velocidad de un metro por segundo” (5).

2.1.3. LEY DE BIOT-SAVART

Jean Baptiste Biot y Félix Savart establecieron que un elemento de corriente genera un campo magnético. “Un elemento de corriente es la intensidad que fluye por una porción tangente al hilo conductor de longitud infinitesimal y cuyo sentido es el de la corriente eléctrica ($d\vec{l}$). Su expresión viene dada por $I \cdot d\vec{l}$ ” (5).

La ley de Biot-Savart establece que “La densidad de flujo magnético creada por una corriente eléctrica rectilínea indefinida en un punto, es proporcional a su intensidad e inversamente proporcional a la distancia entre el punto y la corriente” (5).

De estas afirmaciones podemos extraer que el campo magnético es producido por el movimiento de una carga, lo que también incluye a la propia corriente eléctrica. Además, hay que destacar que sólo una carga en movimiento puede estar sometida a la acción de un campo magnético. Y mediante la Ley de Biot-Savart podemos calcular el campo magnético en un punto producido por un cable que porta una corriente:

$$\overrightarrow{dB} = \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{I \cdot \overrightarrow{dl} \times \hat{r}}{r^2}$$

y donde el elemento:

\overrightarrow{dB} = Inducción magnética en el determinado punto. Se mide en Teslas (T).

μ_0 = Permeabilidad magnética en el vacío, cuyo valor es de $4\pi \cdot 10^{-7}$ ($\frac{m \cdot kg}{C^2}$).

I = Intensidad que circula por el conductor ($d\vec{l}$). Sus unidades son el Amperio (A).

$d\vec{l}$ = vector dirección de la corriente eléctrica. Se mide en metros (m).

\hat{r} = vector unitario que señala la dirección de $d\vec{l}$ al determinado punto donde se calcula la inducción.

r = Distancia desde el cable hasta el punto en estudio. Se mide en metros (m).

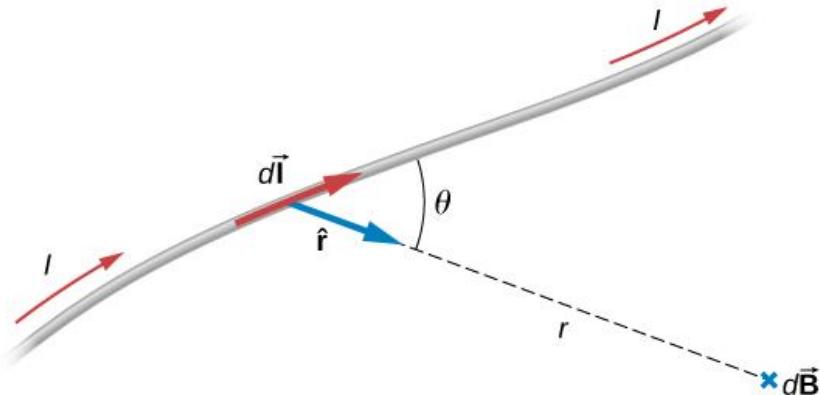


Figura 2: Ley de Biot-Savart. Fuente: phys.libretexts.org

La ley de Biot-Savart (Figura 2) viene expresada según la fórmula: (6)

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \int_l \frac{I \cdot d\vec{l} \times \vec{r}}{r^2}$$

Si ahora consideramos un conductor rectilíneo de longitud L, que porta una corriente de I amperios y calculamos la inducción en un punto X:

Tomando la fórmula extraída del libro “Electromagnetismo y Circuitos Eléctricos” (7), ya que no es objeto de este documento la demostración matemática de la obtención de dicha fórmula, tenemos que la inducción magnética producida por un conductor rectilíneo queda como:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I}{4\pi \cdot r} (T)$$

Siendo:

r= distancia desde el conductor al punto X en estudio.

En el caso de la inducción en un punto producido por una espira tenemos que la inducción, procediendo de manera análoga al caso anterior la podemos calcular con la fórmula:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I \cdot R^2}{2(R^2 + x^2)^{\frac{3}{2}}} (T)$$

Donde el elemento:

R= Radio de la espira medido en metros (m).

x=Distancia perpendicular desde el plano que contiene la espira al punto en estudio (en metros (m)).

Ahora, si en vez de tomar una espira, pensamos en una bobina formada por N espiras idénticas y suponemos que están situadas en un mismo plano fruto de su proximidad, cada espira produce la misma inducción magnética, y la bobina en su conjunto:

$$B = \frac{N \cdot \mu_0 \cdot I \cdot R^2}{2(R^2 + x^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (T)$$

Siendo:

N =Número total de espiras que conforman la bobina.

Con esta fórmula podríamos calcular la inducción que produce una bobina que se encuentra formando parte del circuito electromagnético del motor tomando en cuenta algunos factores como, por ejemplo, la permeabilidad magnética del hierro que conforma los núcleos polares (8).

2.1.4. LA LEY DE LAPLACE

No podemos entender el funcionamiento o simplemente el porqué del giro de un motor sin tener en cuenta la ley de Laplace (9). Situando un conductor que porta una corriente eléctrica de I amperios en las inmediaciones de un campo magnético de inducción \vec{B} , este experimenta una fuerza que viene dada por la expresión:

$$d\vec{F} = I \cdot (\vec{dl} \times \vec{B}) \quad (N)$$

Que expresada en valores finitos queda de la forma:

$$F = B \cdot l \cdot I \cdot \sin(I^\wedge B) \quad (N)$$

En la cual:

F = Fuerza que experimenta el conductor en el campo magnético en Newtons. (N).

l = Longitud total del conductor en metros. (m).

Suponiendo que la inducción magnética sea perpendicular a la corriente, la dirección de la fuerza resultante vendrá determinada por el producto vectorial anterior. El sentido lo podemos obtener por medio de la regla de Fleming de la mano izquierda, que podemos observar en la Figura 3.

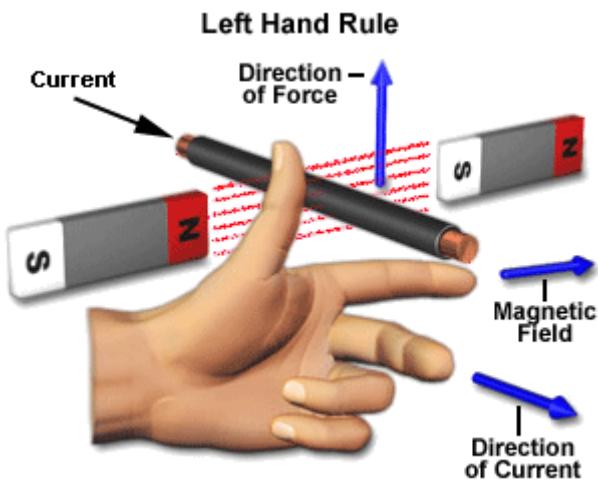


Figura 3: Regla de Fleming de la mano izquierda. Fuente: electrical4you

Esta regla nos indica que si situamos los dedos en posición como si de un triángulo se tratase, e imaginamos que el dedo índice representa la inducción, y que el dedo corazón representa la corriente, el sentido de la fuerza nos viene determinado por el dedo pulgar.

2.2. ¿POR QUÉ MOTORES DE CORRIENTE CONTINUA?

La máquina de corriente continua ha tenido una gran importancia a lo largo de la historia. El generador de corriente continua o dinamo pasó a los libros de historia como la primera máquina que se usó para producir energía eléctrica a gran escala.

Por otro lado, la principal ventaja que los motores de corriente continua ofrecían en la industria como en la fabricación del papel o en el transporte como eran los vehículos ferroviarios se debía a la facilidad con la que se podía controlar la velocidad y el par de dichos motores. Pero con el desarrollo de la electrónica de potencia, los motores DC (Direct Current, Corriente Continua) han ido perdiendo importancia en detrimento de los motores de corriente alterna, ya que son más baratos de construir y tienen un mantenimiento más reducido. (10)

Ahora bien, en cuanto a lo que corresponde a los motores que hasta aquí nos traen, cuentan con algunas ventajas de un tipo de motor y del otro. Por ejemplo, como los motores de AC (Altern Current, Corriente Alterna) carecen de escobillas, por lo que el mantenimiento es más reducido que con los motores DC. Estos últimos, por otro lado, al ser alimentados mediante corriente continua son idóneos para usar en sistemas móviles con batería.

2.3. DESARROLLO CONSTRUCTIVO DE LOS MOTORES BLDC.

Los motores BLDC, como su nombre (en inglés, Brushless Direct Current) indica, son un tipo de motores alimentados mediante corriente continua, y a diferencia de los motores DC convencionales, estos no llevan escobillas (brushes). La comutación necesaria para que el rotor

gire se realiza mediante transistores MOSFET en el circuito llamado ESC (Electronic Speed Controller).

De esta manera, nos encontramos con una primera ventaja que es que debido a la ausencia de escobillas eliminamos las pérdidas que en este elemento se producen en un motor de corriente continua convencional. Y en suma a esto hay que destacar que debido a la ausencia de estos elementos rozantes el mantenimiento se ve notablemente reducido a causa de que no se produce en los motores BLDC un desgaste continuo. Tampoco se producen en los motores brushless chispazos fruto de la conmutación que sí podemos observar en los motores DC con escobillas.

De manera general podemos dividir el motor brushless en dos partes significativas, el rotor y el estator. Además, como decíamos, es necesario para el control de este motor un circuito llamado ESC que, a pesar de no formar parte del motor, estos siempre van a tener que ir de la mano. El hecho de que este motor necesite de un circuito adicional para poder ser accionado es, en comparación con otros motores que no necesitan de circuito específico para su funcionamiento, una posible desventaja. Ya que la necesidad de un circuito adicional supone, aunque mínima una complejidad adicional y, además se traduce en un aumento de puntos donde se puede producir un fallo del sistema.

2.3.1. ESTATOR

El estator, como su propio nombre indica, y como apuntábamos en los objetivos del documento es la parte fija del motor. Este elemento está formado por chapa magnética apilada. Tiene una serie de ranuras donde van arrolladas las bobinas (coils) que crean el campo magnético necesario para repeler y/o atraer el campo magnético creado por el rotor.

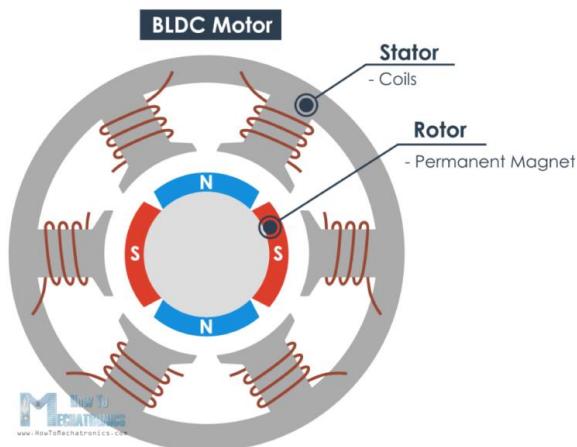


Figura 4: Detalle de las partes del motor BLDC. Fuente: HowToMechtronics.

En la Figura 4 podemos ver de manera simplificada los núcleos polares sobre los cuales van arrolladas las bobinas. Estas bobinas junto con los núcleos magnéticos del estator conforman el circuito electromagnético del motor, y este lo podemos encontrar en configuración monofásica, bifásica y trifásica, aunque trataremos únicamente con la configuración trifásica debido a que es la más común de entre las tres.

La configuración trifásica de las bobinas se basa en una conexión en estrella de los devanados. En el motor tenemos tres bornes de conexión (A, B y C en la Figura 5), es decir, por una parte, tenemos un extremo de cada bobinado por donde alimentaríamos al circuito y, por otro lado, los otros tres extremos están conectados entre sí en un punto común.

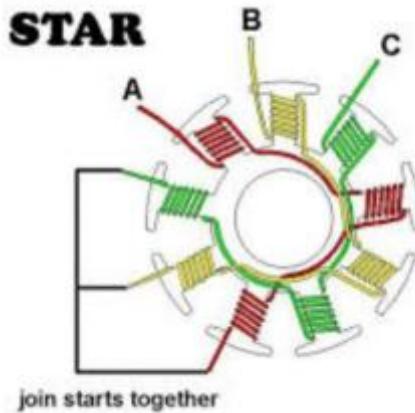


Figura 5: Configuración en estrella (Star) de los bobinados de un motor. Fuente: e-radiocontrol.com.

Según la fuerza contraelectromotriz que en el motor se produce, podemos encontrar dos tipos diferentes de bobinados de estator, el sinusoidal y el trapezoidal. La forma de esta señal depende de la disposición de los arrollamientos que conforman las bobinas y de la distancia de entrehierro¹. Así, un entrehierro variable creará una forma de onda sinusoidal, mientras que un entrehierro constante no lo hará. Debido a la distancia variable del entrehierro, donde haya una menor distancia tendremos mayor número de líneas de campo, por tanto, mayor inducción y como consecuencia mayor fuerza electromotriz. Este es el caso de algunos motores de corriente alterna sincrónicos que cuentan con piezas polares diseñadas con una geometría para tal efecto. No siendo así en el caso que nos atañe debido a que la distancia de entrehierro del motor BLDC es constante, obteniendo de esta manera una fuerza contraelectromotriz de forma trapezoidal.

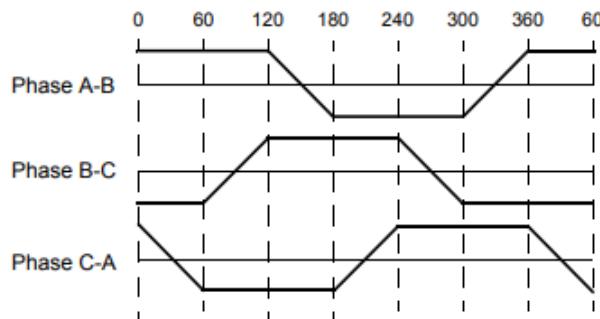


Figura 6: Fuerza contraelectromotriz de forma trapezoidal producida por un BLDC. Fuente: Microchip.

¹ El entrehierro (o airgap) en un motor eléctrico es el espacio de aire o separación entre el estator y el rotor.

En la Figura 6 podemos ver como los bobinados de un motor BLDC generan una onda de fuerza contraelectromotriz de forma trapezoidal que se opone a la tensión de alimentación del motor de acuerdo con la ley de Lenz.

La Ley de Lenz, según lo enunciado en el libro de “Fundamentos electromagnéticos para la ingeniería” dice así (5): “El sentido de la corriente inducida es tal que por sus efectos electromagnéticos se opone a la variación del flujo que la produce”. La ley de Lenz es la interpretación del signo de la ecuación que expresa la Ley de Faraday:

$$e = -\frac{d\varphi}{dt} \text{ (V)}$$

De este modo, la fuerza contraelectromotriz generada por la rotación del motor en cada bobinado dependerá de la velocidad con la que este gire, del campo magnético que los imanes del rotor produzcan y del número de espiras de las bobinas del estator. Y vendrá dada por la ecuación:

$$e = -2 \cdot B \cdot l \cdot r \cdot \omega \cdot N \text{ (V)}$$

donde:

r = radio del motor (en metros).

ω =velocidad de rotación del motor (rad/s). (11)

2.3.2. ROTOR

El rotor de cualquier motor eléctrico, como su propio nombre indica, es la parte del motor que gira. Esta pieza o conjunto de piezas consta de una barra o eje sobre el que gira de manera longitudinal y sobre el cual van montados los imanes permanentes. Este tipo de configuración del motor brushless se conoce como inrunner.

Si, por otro lado, tenemos un motor donde su eje central está anclado por medio de la base del motor a la bancada, en este caso dicho eje es la parte inmóvil del motor. Sobre él, van montados los bobinados y los imanes permanentes los tenemos dispuestos en un rotor en forma de anillo alrededor del eje (bobinado) del motor. En este caso, esta configuración se la conoce como outrunner.

En el siguiente apartado trataremos con las características de cada configuración y veremos qué características tienen los motores brushless inrunner y los outrunner.

Volviendo a los detalles constructivos del rotor, tenemos que este está constituido, como indicábamos al principio, por imanes permanentes. Estos imanes se disponen de manera alterna, polo norte - polo sur. En nuestro caso, el motor con el que procederemos a realizar las pruebas consta de siete pares de polos montados en su rotor. (Características del motor BR-2804.).

A la hora de realizar el diseño y construcción del motor, en función de la densidad de flujo magnético que se necesita, se eligen los materiales con los que se tienen que construir los imanes permanentes del motor. Por un lado, tenemos los materiales ferrosos, que han sido muy utilizados a lo largo de la historia de la construcción de motores eléctricos y que además son más económicos, pero por otro lado tienen la desventaja de que para un volumen determinado tienen menor densidad de campo magnético. Además, fruto de la investigación, se han desarrollado y siguen en proceso de avance nuevos materiales y aleaciones que permiten tener una mayor densidad de flujo magnético con un menor volumen de imán. Estos imanes permiten la construcción de motores que para un mismo torque² el volumen total de la máquina sea menor que el de un motor construido con imanes de materiales ferrosos, u obtener un torque mayor para un mismo volumen.

Algunos ejemplos de los nuevos materiales magnéticos son el Neodimio, Samario Cobalto (SmCo) y la aleación de Neodimio, Ferrita y Boro (NdFeB). (11)

Dependiendo de cómo están montados los imanes en el rotor, podemos encontrar diferentes tipos de disposiciones, y estas son, montados en la superficie del rotor, enterrados en el rotor y encastrados en este.

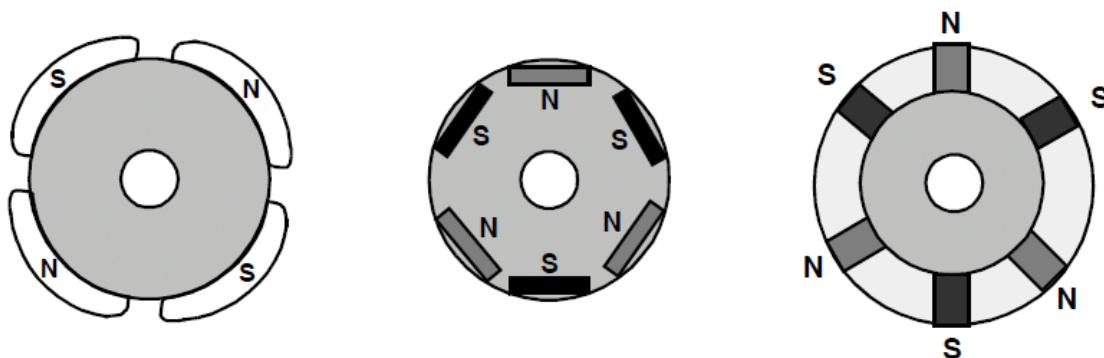


Figura 7: Disposición de los imanes: En superficie, enterrados y encastrados. Fuente: Microchip.

Se indica como detalle que el motor del que disponemos tiene los imanes montados en superficie, aunque en este caso, a diferencia de la primera ilustración de la Figura 7: Disposición de los imanes: En superficie, enterrados y encastrados. Figura 7, el motor es outrunner.

2.3.3. RELACIÓN BOBINAS (RANURAS) VS. POLOS.

A la hora de construir y/o seleccionar un motor, hay que tener en cuenta un parámetro que se denomina factor de devanado. Este factor, un número que se encuentra entre los valores de 0 y 1 expresa la parte de la corriente de armadura que se usa para producir el par en el motor eléctrico (12). Es decir, el par de un motor eléctrico es proporcional al factor de devanado fundamental y, viene determinado por: (13)

² El par (Torque en inglés) es el momento de fuerza que ejerce un motor sobre su eje. Además, el par de un motor se puede calcular dividiendo la potencia entre la velocidad.

$$k_w = k_p \cdot k_d \cdot k_s$$

Donde:

k_w = Factor de bobinado o devanado.

k_p = Factor de acortamiento (o paso).

k_d = Factor de distribución.

k_s = Factor de inclinación de ranura.

Los valores que toma el factor de devanado según la combinación de polos y bobinas nos da la siguiente tabla extraída del documento “*Distribution, coil-span and winding factors for PM machines with concentrated windings. S. E. Skaar, Ø. Krøvel, R. Nilssen*”. (14)

Ns/Nm	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34
3	0.866	0.866	q<1/4														
6	q>1/2	0.866	0.866	q<1/4													
9	q>1/2	0.866	0.945	0.945	0.866	q<1/4											
12		q>1/2	0.866	0.933		0.933	0.866	q<1/4									
15			q>1/2	0.866		0.951	0.951		0.866	q<1/4							
18				q>1/2	0.866	0.902	0.945		0.945	0.902	0.866	q<1/4					
21					q>1/2	0.866	0.89		0.953	0.953		0.89	0.866	q<1/4			
24						q>1/2	0.866	0.933	0.949		0.949	0.933		0.866	q<1/4		
27							q>1/2	0.866	0.877	0.915	0.945	0.954	0.954	0.945	0.915	0.877	
30								q>1/2	0.866	0.874		0.936	0.951		0.951	0.936	
33									q>1/2	0.866		0.903	0.928		0.954	0.954	
36										q>1/2	0.866	0.867	0.902	0.933	0.945	0.953	
39											q>1/2	0.866	0.863		0.917	0.936	
42												q>1/2	0.866		0.89	0.913	
45													q>1/2	0.866	0.858	0.886	
48														q>1/2	0.866	0.857	
51															q>1/2	0.866	
54																q>1/2	

Tabla 1: Valores factor de bobinado según número de bobinas y polos.

En la Tabla 1 podemos ver los diferentes valores que toma el factor de bobinado según la combinación entre el número de bobinas y el número de polos en nuestro motor. La región en gris representa las combinaciones que no son viables, los valores en rosa son las regiones límite con $q = \frac{1}{2}$ y $q = \frac{1}{4}$ ³. Las áreas rojas son áreas que se han dejado fuera por cuestiones de diseño y las áreas rojas oscuras son los valores donde el número de polos es igual al número de bobinas.

2.3.4. INRUNNER VS. OUTRUNNER

Como se puede entender de lo visto hasta el momento, la principal diferencia o, dicho de otro modo, la que en primer lugar se aprecia a simple vista es la disposición del rotor y del estator en el motor. En un primer caso, el motor inrunner dispone de una parte externa fija en forma de anillo, sobre la cual van montados los bobinados. Y una segunda parte interna formada por el eje de la máquina donde se encuentran los imanes permanentes del motor.

³ El valor q es el número de ranuras por polo y fase. Este se calcula como: $q = \frac{N^o \text{ ranuras}}{N^o \text{ polos} \cdot N^o \text{ fases}}$

En la Figura 8 se ve con gran claridad el estator de un motor inrunner. Se observan las piezas polares en cuyas ranuras van introducidas las bobinas del motor. También podemos observar en la Figura 4 un diagrama simplificado de cómo sería un motor inrunner.

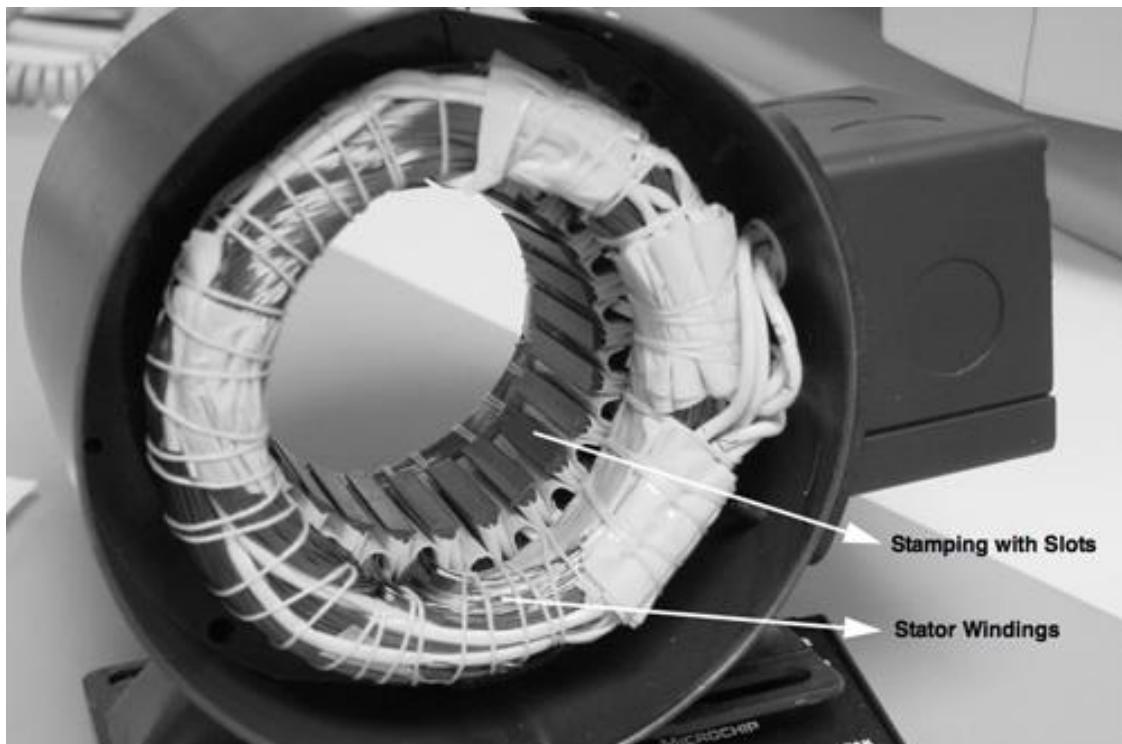


Figura 8: Detalle del estator de un motor brushless inrunner. Fuente: Microchip.

En un segundo caso, tenemos el motor brushless outrunner, este motor consta de un eje central fijo sobre el que va montado el bobinado de la máquina. Y una parte externa en forma de anillo donde van montados los imanes permanentes del motor y que gira alrededor del eje, es decir, esta parte externa, en el motor outrunner es el rotor.



Figura 9: Detalle del estator (derecha) con bobinado concentrado y del rotor (izquierda) de un motor outrunner.
Fuente: Archivo del autor.

En la Figura 9 podemos observar las partes de un motor outrunner muy común en la construcción de drones. Este motor de la imagen tiene, por una parte, un estator donde vemos las bobinas del motor junto con sus tres terminales de conexión (cables rojo, negro y amarillo). En él encontramos un total de 6 pares de bobinas, al igual que en el motor que usaremos para el desarrollo del control FOC.

Ahora hay que clarificar que a diferencia de lo que antes se había expuesto en la explicación de los motores outrunner para que se entendiera de manera más clara su construcción, el eje físico, es decir, la barra metálica central del motor sigue perteneciendo al rotor. Y esta barra está anclada al anillo (rotor del motor outrunner) e introducida en el agujero que sería el eje (imaginario)⁴ del estator del motor outrunner. Y es sobre este anillo donde se encuentran un total de siete pares de imanes norte y sur. También este número coincide con el número de imanes que encontramos en el motor de pruebas.

Antes de terminar este apartado debemos realizar una comparación entre las dos tipologías de motores brushless que acabamos de ver. Si realizamos dicha comparación entre dos máquinas de características similares podemos extraer, en líneas generales, algunas diferencias en su comportamiento dinámico y en sus dimensiones.

En primer lugar, los motores outrunner suelen tener diámetros mayores en comparación con su longitud. Esto lo podemos observar en la Figura 10, donde aparece el motor que usaremos para las pruebas del control FOC. Y, por el contrario, los motores inrunner, como se aprecia claramente en la Figura 11 suelen tener longitudes mayores si tomamos como referencia su diámetro.

⁴ Obsérvese de nuevo la Figura 9 para una mejor comprensión de lo explicado.

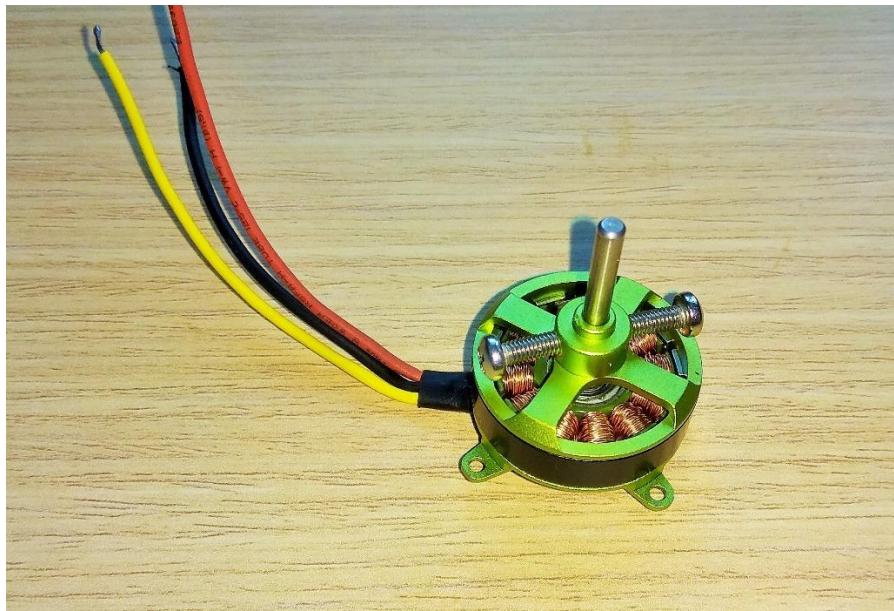


Figura 10: Motor brushless outrunner BR2804-1700Kv. Fuente: Archivo del autor.



Figura 11: Motor brushless inrunner Turnigy XK2845-3650KV. Fuente: Hobbyking.com

Esta característica física que diferencia a ambos motores se puede explicar de la siguiente manera. En un motor outrunner, tenemos una gran longitud de circunferencia donde situar múltiples polos norte-sur. Una cantidad determinada de estos polos interactúan a la vez con las bobinas del estator creando un torque mayor que si solo interactuara un polo con una bobina en cada instante determinado. Por el contrario, en un motor inrunner, la longitud de la circunferencia del rotor donde van montados los imanes es mucho más reducida y como consecuencia, el número de polos que se pueden disponer es menor. Debido a ello, para mantener un nivel de torque requerido se deben disponer de imanes de mayor longitud que en el motor outrunner.

Además, debido a que el espacio para los imanes es más reducido, para obtener una densidad de flujo magnético mayor se deben usar imanes de mayor calidad en los motores inrunner. En contraposición a este factor, debido a que en el motor outrunner se pueden usar imanes de mayor tamaño, el momento de inercia que posee este motor es más elevado que el de los inrunner. Este hecho deriva en que los motores inrunner tienen una mayor aceleración que los outrunner (15).

Para dos motores de similar tamaño, uno inrunner y otro outrunner, la constante kv de cada motor será diferente. La constante kv o revoluciones por minuto (r.p.m.) es un valor característico de cada motor y nos dice a cuantas r.p.m. girará el motor estando en vacío en función de la tensión aplicada. Si, por ejemplo, nuestro motor que tiene una constante kv de 1700 y se le aplica 1V, el motor (estando en vacío) girará a 1700 revoluciones por minuto, y si a este mismo motor le aplicamos 10V, girará a 17000 r.p.m.

Aunque para ser técnicamente correctos, la definición dada del kv no es tan simple. La obtención de las revoluciones del motor mediante el producto de kv por la tensión, aunque no es exacta, sí nos da una idea bastante razonable y cercana de la velocidad de rotación en vacío del motor. Para aclarar de manera más exacta qué es el kv lo explicaremos de manera más detallada más abajo en este documento. (16)

Y prosiguiendo con la comparación de ambos motores, el motor inrunner tendrá un mayor kv que un motor outrunner. Se debe a que como decíamos al principio, el motor inrunner tiene menor número de polos en su rotor, y esto se traduce en que se necesitan menos pulsos del circuito que controla el motor, el ESC (circuito que estudiaremos en su apartado pertinente), para completar una vuelta. Por el contrario, en un motor outrunner, al disponer de un mayor número de polos deriva en que se necesitarán mayor número de pulsos de un mismo ESC para que dicha máquina complete una vuelta entera.

Si comparamos ahora ambos motores de igual potencia, en cuanto al torque que pueden desarrollar cada uno, aquel que tenga mayor velocidad, es decir, el inrunner, será el que menor par desarrollará. Esto se explica mediante la fórmula:

$$P = T \cdot \omega$$

Donde:

P =Potencia en Watios.

T =Par o Torque en N·m.

De modo que, para una misma potencia, a mayor velocidad tendremos menos par o torque. Siendo así el motor outrunner el que mayor par desarrolle. También podemos observar esto en la ecuación:

$$K_t = \frac{1}{K_v}$$

Donde:

K_t =Constante de par del motor.

K_v = Constante de velocidad del motor. (17)

Como última comparación, si queremos saber cuál de ambos es más eficiente, puede ser una tarea más complicada de resolver. Se debe a que, en la eficiencia del motor, no sólo influye el tipo de máquina, sino también el fabricante y los materiales usados, su tamaño y potencia, etc.

Sin embargo, podemos hacernos una idea de qué motor es más eficiente entre dos de similar tamaño por su capacidad de disipación de calor.

Un motor outrunner, tiene los bobinados donde se genera calor en el centro, y este debe fluir por el eje del motor y hacia el exterior. Para facilitar dicha tarea, el rotor tiene unos agujeros de ventilación por los que fluye aire para refrigerar directamente los bobinados.

Por su parte, el motor inrunner tiene las bobinas montadas en el anillo exterior (estator) del motor, que debido a ser una gran superficie metálica facilita su refrigeración de manera más efectiva que en el motor outrunner. Debido a un menor calentamiento, el motor inrunner funciona de manera más eficiente que el motor outrunner. (18)

Finalmente, hay que dejar bien claro que todas las premisas establecidas son a nivel orientativo y que, en última instancia, habría que estudiar en cada caso el motor en particular, ya que como se ha dicho anteriormente, las características y prestaciones de cada motor dependen de muchos factores entre los que se encuentran su potencia, los materiales usados para su construcción, su propia fabricación, su tamaño y su tipología.

2.4. CARACTERÍSTICA KV DEL MOTOR.

Como decíamos previamente, kv es una constante que expresa de una manera bastante aproximada las r.p.m. del motor por voltio aplicado en sus terminales. Es decir, si multiplicamos la tensión de alimentación del motor por su constante kv obtendremos la velocidad de giro del motor en vacío, aunque no de manera exacta.

Ahora bien, como decíamos en el apartado del estator, la fuerza contraelectromotriz (f.c.e.m.) generada por el motor dependerá de la velocidad de rotación de este. Siendo la fórmula que expresa esta relación:

$$E = K_e \cdot \omega$$

Donde:

E = Fuerza contraelectromotriz (V).

K_e = Constante de f.c.e.m. (V/rad/s).

ω = Velocidad angular del motor. (rad/s).

Dado esto, podemos exponer el circuito equivalente del motor brushless:

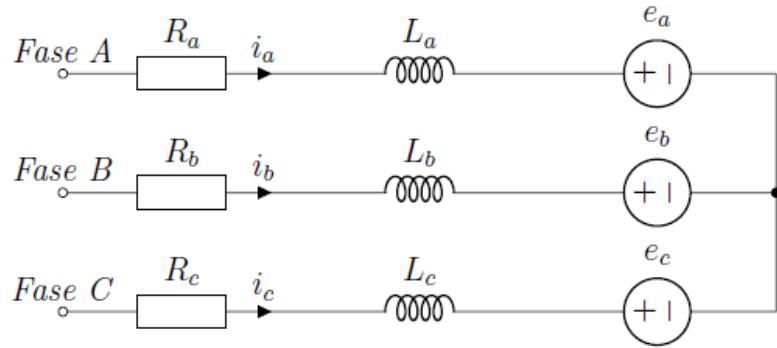


Figura 12: Circuito equivalente motor brushless.

El circuito de la Figura 12 muestra las tres fases de un motor brushless. En él, vemos indicadas las características eléctricas que definen a este motor.

Tomando la fase A como ejemplo encontramos: R_a , una resistencia que representa las pérdidas en el cobre; L_a , que simboliza las bobinas del estator; y una fuente E_a que representa la f.c.e.m. que se opone a la tensión principal de alimentación según la Ley de Lenz.

Si suponemos la corriente a través del circuito como constante, vemos que la bobina se convierte en cortocircuito, por tanto, analizando el circuito tenemos que la tensión entre el borne de alimentación de la fase A y el punto neutro (punto común a las tres fases) queda como:

$$V = I \cdot R + E_a = I \cdot R + K_e \cdot \omega$$

Y de esta fórmula podríamos despejar y calcular la velocidad del motor:

$$\omega = \frac{V - I \cdot R}{K_e}$$

Conociendo K_e de la ficha técnica del motor al igual que R , y midiendo la corriente en vacío del motor y la tensión de alimentación podemos obtener la velocidad de rotación de la máquina.

Y la constante K_v es la inversa de la constante K_e , siendo:

$$K_v = \frac{1}{K_e}$$

Así, nuestro motor de $1700K_v$ generará 1V de f.c.e.m. cuando gire a 1700 r.p.m. y generará 10V cuando lo haga a 17000 r.p.m.

Y para finalizar este apartado, cabe incluir la constante de torque o par motor que viene dado por la fórmula:

$$T = K_t \cdot I$$

En la cual:

T = Torque o par motor (Nm).

K_t = Constante de par (Nm/A).

I = Intensidad que consume el motor (A).

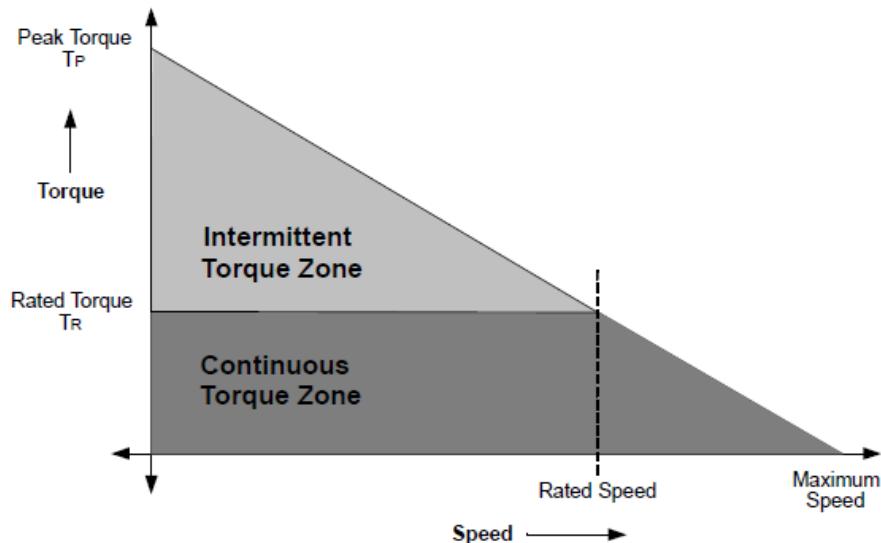


Figura 13: Característica Par/Velocidad motor brushless. Fuente: Microchip.

En la Figura 13 se observa la característica de par-velocidad de un motor BLDC. Los valores más representativos que podemos extraer de una gráfica como la que se presenta son los de la velocidad y el par nominal.

2.5. ELECTRONIC SPEED CONTROLLER.

El ESC (Electronic Speed Controller) es el circuito que se encarga de controlar el motor brushless. Este transforma la energía que proviene de una batería o de un convertidor de alimentación de corriente continua, según se trate un vehículo o un equipo estacionario, en un sistema de corrientes trifásico para alimentar los tres bobinados del motor.

El ESC cuenta con una etapa de potencia constituida por al menos 6 transistores MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor). Estos semiconductores actúan como interruptores conectando y desconectando las bobinas entre la tensión de alimentación y tierra (GND). Los MOSFET son una opción idónea para esta aplicación debido a sus reducidas pérdidas producidas por su muy baja $R_{DS(ON)}$, la resistencia típica en conducción de estos semiconductores. Y, además, nuestra aplicación es de baja tensión y corriente, por lo que no va a suponer una limitación los

valores máximos que pueden soportar los MOSFET, valores más reducidos que los que pueden soportar otros semiconductores como son los IGBT, caracterizados por tener mayores pérdidas que los primeros. (19)

Otro punto a favor de los MOSFET es que se controlan a través de su puerta (Gate) mediante una señal de tensión, no siendo necesario un controlador que aporte mucha potencia. Este valor de tensión debe ser superior a un valor característico de cada modelo de semiconductor y viene dado en la hoja de características mediante el nombre Gate Threshold Voltage.

El circuito del ESC también debe incorporar dicho controlador para gobernar los MOSFET. (20) Éste se encarga de transformar o traducir la petición de velocidad que desde un microcontrolador se envía al ESC para gobernar al fin y al cabo la rotación del motor. Es decir, desde el microcontrolador, el usuario o sistema envía al ESC una petición de velocidad, esta petición es recibida por el controlador incorporado en el circuito y este, a su vez, traduce esta señal que indica un nivel de velocidad concreto, a una frecuencia de conmutación determinada para los MOSFET con la finalidad de que el campo magnético del estator cambie su frecuencia de giro, lo que se traduce en que el rotor, obligado a seguir el campo magnético del estator varíe su velocidad.⁵

La conmutación de los MOSFET se realiza como se muestra en la Figura 1Figura 14, en ella podemos observar que para que el motor complete una vuelta total es necesario que se completen seis pasos o steps (21). De la figura podemos extraer que la tensión entre la alimentación y tierra es aplicada entre dos bobinas, dejando la tercera al aire.

Variando la duración de esas seis conmutaciones podemos controlar la velocidad de rotación del motor. Es decir, cuanto menor sea el ancho de pulso de la señal PWM menor será la duración de un paso (step) y el rotor se verá obligado a seguir el campo magnético del estator a mayor velocidad.

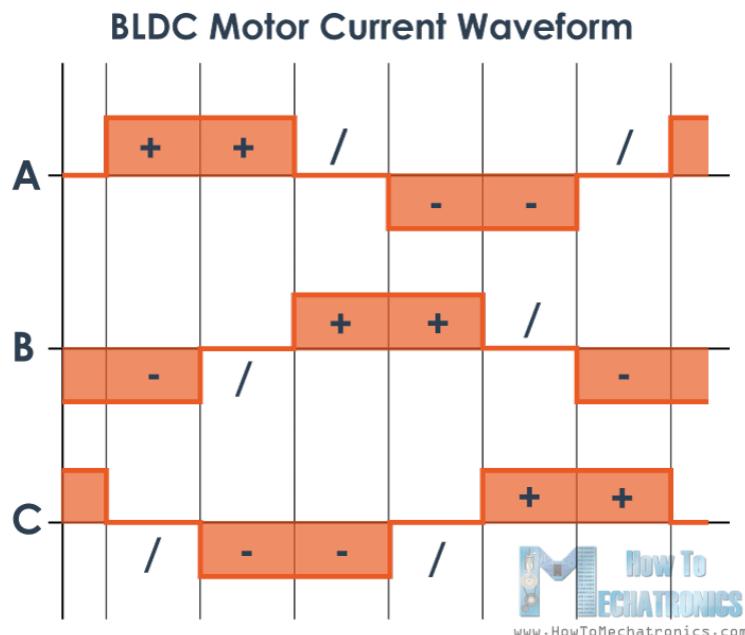


Figura 14: Comutación de los MOSFET en un motor BLDC. Fuente: HowToMechatronics.

⁵ Recordemos que el motor BLDC es un motor síncrono, es decir, su rotor gira a la misma velocidad que el campo magnético del estator.

En la Figura 15 vemos un esquema simplificado del circuito del ESC. En él, podemos ver en la parte izquierda de la figura, el controlador del circuito. Éste tiene, por una parte, una serie de entradas que por lo general serán las que vemos en el esquema, de petición de marcha/paro, de dirección y de consigna de velocidad. También serán entradas a este controlador las señales enviadas por una parte del circuito encargado de medir la f.c.e.m. producida por las bobinas del motor debido al giro del rotor. La detección de la f.c.e.m. mostrará al controlador la posición del rotor de la máquina, permitiéndole de esta manera la conmutación de fase para un correcto funcionamiento del motor.

Por otra parte, en cuanto a las salidas, el procesador constará de seis señales de control de los semiconductores de potencia (seis en total que conforman el puente inversor), que podemos ver en el centro del esquema. Los semiconductores forman lo que se conoce como puente inversor, éste toma la corriente desde el sistema de alimentación y conmuta a la frecuencia pertinente según lo que le ordena el procesador para que el motor establezca la velocidad requerida por un usuario o sistema que introduce un valor de referencia.

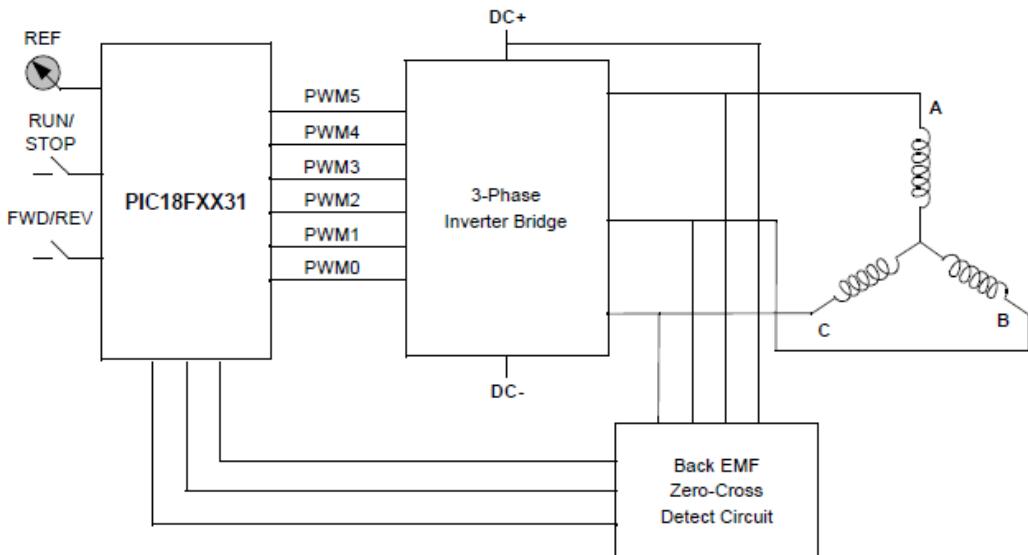


Figura 15: Esquema funcional del circuito ESC. Fuente: Microchip.

Para mostrar de manera más clara como se energizan las bobinas, en la Figura 16 vemos el proceso que sigue el circuito del ESC para hacer que el rotor de la máquina complete una vuelta entera. Como decíamos la tensión entre el positivo y tierra es aplicada entre dos bobinas del estator. La tercera bobina se queda al aire, pero fruto del giro del rotor, más específicamente de los imanes que este lleva montados en él, en esta tercera bobina se inducen unas tensiones que vienen determinadas por la ley de Lenz, expuesta anteriormente.

Este fenómeno sirve al ESC para conocer la posición del rotor y poder determinar cuándo debe realizar con exactitud la conmutación necesaria para que el rotor siga girando de la manera más suave posible. Gracias a la inducción que se produce en la tercera bobina que queda al aire en cada conmutación podemos saber de la posición del rotor sin necesidad de usar sensores como pueden ser los sensores de efecto Hall o los encoders.

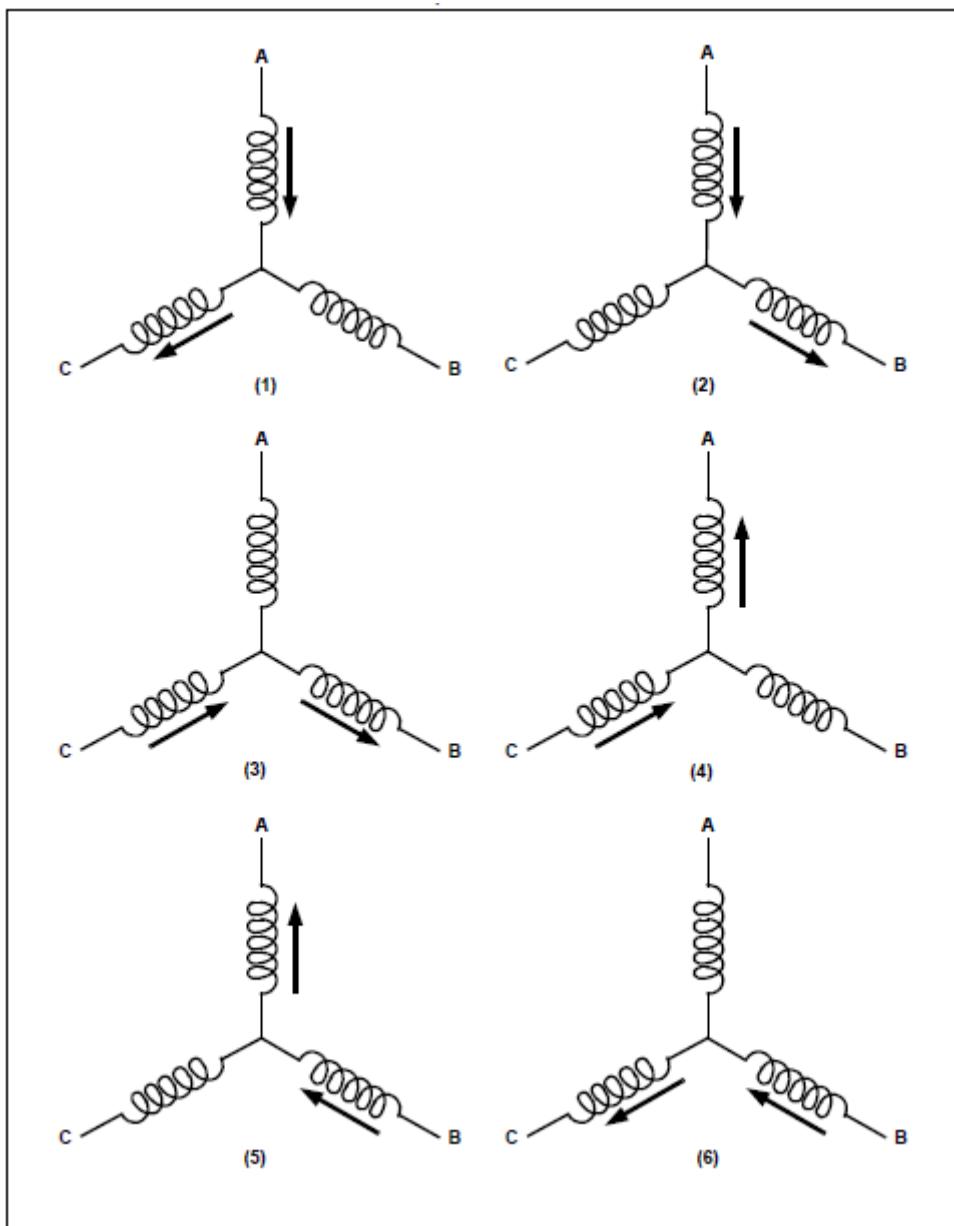


Figura 16: Proceso de conmutación (energización) de los bobinados del motor. Fuente: Microchip.

2.6. APLICACIONES DE LOS MOTORES BLDC.

Los motores brushless son una clase de máquina que están experimentando una serie de aplicaciones muy variadas y cada vez más extendidas. Debido a sus características son idóneos para múltiples aplicaciones, algunas de las cuales se indican a continuación:

- Drones. Es difícil concretar si este es el uso más extendido de los motores BLDC, lo que sí se puede afirmar es que sea el más conocido. Actualmente, desde drones profesionales como los usados para vigilancia de carreteras o drones militares hasta drones de recreo construidos por aficionados, todos ellos cuentan con este tipo de motor. Se debe principalmente a su buena relación entre el peso y volumen, además de contar cada vez con un precio más apetible para el público general.

- Industria Aeroespacial. Estos motores son usados y han sido usados en las misiones “Apollo”, en la circulación de aire de los vehículos espaciales. Esto se debe a que, como se dijo anteriormente, estos motores tienen un mantenimiento prácticamente nulo y poseen gran fiabilidad.
- Aplicaciones marinas. Al igual que esto motores se pueden usar para drones aéreos, también pueden ser equipados en drones submarinos. Estas máquinas, con el índice IP⁶ adecuado (de 66 en adelante) son capaces de ser usados en vehículos de propulsión para buceadores y drones hasta para propulsar barcos.
- Aplicaciones médicas. Según la web “KDEDirect”, este tipo de máquinas han visto un incremento significativo para este uso en 2018. Otra característica mencionada anteriormente, la no aparición de chispas fruto de la ausencia de un conmutador físico, los hace ideales para no interferir con otros equipos electrónicos sensibles.
- Robótica. La ausencia de escobillas permite reducir el peso del motor y también que este gire más rápido. Además de un ruido menor por la ausencia de estos elementos. Estos motores se usan en rovers, robots de servicio e incluso en robots de batalla.
- Transporte. El número de vehículos propulsados mediante este motor se está incrementando notablemente. Con las nuevas necesidades de movilidad y un transporte más limpio, son cada día más comunes los vehículos eléctricos y en particular, los que usan estos motores. Entran en esta categoría los patinetes eléctricos, las motos, hoverboards, etc. (22)

2.7. MOTORES BLDC VS. MOTOR SÍNCRONO, ASÍNCRONO Y DC.

En el siguiente apartado se muestran diferentes comparaciones entre el motor protagonista de este documento, el motor Brushless de corriente continua y los motores más comunes en la industria.

Entre ellos se expone el motor sincrónico de imanes permanentes o PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motor), el cuál a diferencia del BLDC, es alimentado a través de corriente alterna. En un segundo caso se compara con la máquina asíncrona o de inducción, también alimentada por corriente alterna y cuyo rotor puede ser bien en jaula de ardilla o bobinado. Y en última instancia se presenta una comparación con el motor convencional de corriente continua, es decir, con el motor DC con escobillas.

2.7.1. MOTOR BLDC VS. MOTOR SINCRÓNICO DE IMANES PERMANENTES.

El motor sincrónico de imanes permanentes es un tipo de máquina que se alimenta mediante corriente alterna. Este motor consta de un estator en el cual tiene los devanados dispuestos de manera distribuida. Estos devanados son alimentados mediante una corriente sinusoidal para obtener de este modo un par constante. (23) Por otro lado, en el rotor de la máquina van montados los imanes permanentes, al igual que en el motor brushless. Además, este motor es

⁶ El índice IP clasifica y señala el grado de protección que otorga el contenedor que protege a un equipo frente a la entrada de diferentes elementos como polvo y/o agua o ante contactos accidentales.

necesario que lleve incorporado un sensor de posición preciso para saber en todo momento en qué posición se encuentra el rotor de la máquina.

En la siguiente tabla se presentan las principales diferencias entre el motor BLDC y el motor PMSM: (24)

PMSM	BLDC
El motor sincrónico tiene los devanados distribuidos, consiguiendo así una f.c.e.m. sinusoidal.	El motor brushless tiene los devanados concentrados, consiguiendo así una f.c.e.m. trapezoidal.
Potencia y par electromagnético constantes.	
El motor sincrónico necesita un sensor de posición preciso para conocer la posición del rotor en cada instante.	El motor brushless tiene un control de posición cada 60° eléctricos, lo que hace su control más simple.
Ambos motores requieren de la misma electrónica, 6 transistores.	
Alimentado mediante el vector de tensión.	Alimentado mediante el vector de corriente.
El rizado del par que tiene este motor puede ser prácticamente despreciable.	Este motor sí que tiene un rizado en el par fruto de las conmutaciones.
El debilitamiento del campo es mayor en los BLDC que en los motores PMSM.	
La construcción del motor síncrono es más compleja que la del motor brushless y, por tanto, más cara.	
El motor BLDC es mejor para velocidades más bajas y el PMSM permite trabajar a velocidades más altas.	

El PMSM es una máquina más silenciosa que el motor brushless.

Tabla 2: Comparativa entre el motor PMSM y el BLDC.

2.7.2. MOTOR BLDC VS. MOTOR ASÍNCRONO.

El motor asíncrono de inducción es una máquina eléctrica que funciona mediante la alimentación con corriente alterna. Este motor posee un estator donde se encuentran los devanados distribuidos. Son estos los que producen el campo magnético rotatorio y que inducen un voltaje en el rotor que a su vez generan unas corrientes en el rotor formado por conductores cortocircuitados y acero laminado. A su vez, estas corrientes interactúan con el campo magnético del estator y generan las fuerzas que hacen girar al rotor. Estas fuerzas aparecen debido a la interacción entre campos magnéticos fruto de la diferencia entre velocidad del campo magnético del estator, que es igual a la de la frecuencia eléctrica de alimentación, y la velocidad de giro del rotor que es unos hercios por debajo a la del estator, de ahí que en este motor haya una característica denominada deslizamiento, que se calcula como:

$$s = \frac{n_s - n_{rot}}{n_s}$$

Donde:

s =deslizamiento.

n_s = velocidad de sincronismo (en r.p.m.), igual a la frecuencia eléctrica de alimentación (en España 50 Hz).

n_{rot} = velocidad de giro del rotor (en r.p.m.).

Las diferencias entre ambos motores se presentan a la siguiente tabla: (25) (26)

MOTOR DE INDUCCIÓN	BLDC
El motor de inducción desarrolla un nivel de par menor a velocidades reducidas.	El motor BLDC puede operar a cualquier velocidad con su nivel de par nominal.

La relación potencia/tamaño en el motor de inducción es más reducida que en el motor brushless.	
El motor BLDC tiene mejores características dinámicas que el motor de inducción.	
El motor de inducción no necesita ningún tipo de circuito adicional para funcionar a velocidad fija. Sí lo necesita en caso de esta sea variable.	El motor brushless necesita en cualquier caso de un circuito adicional (ESC) para su funcionamiento.
En el motor de inducción se produce un deslizamiento y este aumenta con la carga del motor.	No se produce deslizamiento entre la velocidad del campo magnético del estator y la velocidad de giro del rotor.
El motor brushless se refrigerará más fácilmente y por tanto, su punto de eficiencia es más elevado que el del motor de inducción.	
El máximo valor del factor de potencia con el que puede trabajar el motor de inducción es alrededor de 0,85.	El motor brushless puede trabajar con un factor de potencia cercano a la unidad.
En los motores de inducción podemos ajustar la inducción magnética mediante el uso de un convertidor apropiado.	En los motores BLDC la inducción magnética producida por los imanes permanentes no se puede modificar.

Tabla 3: Comparación entre el motor de inducción y el motor BLDC.

2.7.3. MOTOR BLDC VS. MOTOR DC.

Como decíamos previamente en un apartado previo, las máquinas de corriente continua han tenido una gran importancia en las páginas de la historia. El motor de corriente continua ha tenido una gran importancia debido a su facilidad para el control de la velocidad, y antes de la modernización de la electrónica de potencia, estos motores tenían un papel indiscutible en aquellas aplicaciones donde la variación de la velocidad era un requerimiento indispensable. Así, por ejemplo, los primeros vehículos ferroviarios con tracción eléctrica fueron equipados con máquinas de corriente continua precisamente por la simplicidad de su regulador de velocidad.

Otro ejemplo del uso de esta máquina era la industria del papel, donde un único motor de corriente continua se encargaba por medio de engranajes de mover toda la cadena de producción. Y como no, su uso se debía a su facilidad de regulación de velocidad.

La máquina de corriente continua está constituida por un rotor bobinado y por un estator que bien está formado por imanes permanentes, especialmente en máquinas de pequeña potencia, o bien la excitación de la máquina se produce mediante electroimanes, en máquinas de potencia elevada. Además, la máquina DC realiza por medio de escobillas la commutación del campo magnético necesaria para su funcionamiento, lo que le otorga una serie de inconvenientes. (27)

MOTOR DC	BLDC
La commutación en estos motores es por medio de elementos mecánicos, las escobillas.	La commutación en el motor BLDC se realiza mediante electrónica, es decir, mediante el uso de transistores.
El mantenimiento del motor DC es mucho más elevado debido a la necesidad de revisar y/o cambiar las escobillas	El mantenimiento de este motor es notablemente más reducido que el del motor con escobillas.
El par disminuye conforme aumenta la velocidad. El rozamiento de las escobillas aumenta con la velocidad.	El motor BLDC permite operación a cualquier velocidad con su par nominal.
El motor BLDC no tiene limitaciones mecánicas en cuanto a la velocidad debido a la ausencia de elementos rozantes (escobillas).	
Los arcos producidos por la commutación mecánica en las escobillas de los motores DC puede causar ruido eléctrico que en los motores BLDC no se produce.	
El coste de construcción del motor BLDC es superior debido al uso de imanes permanentes (ya que en los motores DC se puede usar excitación electromagnética)	
El control del motor BLDC es más complejo y, por tanto, más caro.	

Para el funcionamiento a velocidad fija no necesita controlador. Para el control de velocidad se necesita un controlador de gran simplicidad.	El motor BLDC siempre necesita de un controlador (ESC) para su funcionamiento.

Tabla 4: Comparación entre el motor DC (con escobillas) y el motor brushless.

3. EL CONTROL FOC (FIELD ORIENTED CONTROL).

El control FOC (Field Oriented Control) o control vectorial es el método más eficiente de accionar un motor eléctrico. Este fue desarrollado por K. Hasse y F. Blaschke a finales de los 60 y principios de los 70. Inicialmente fue pensada para los motores de inducción, pero posteriormente se desarrolló para los motores síncronos como método para reducir el rizado del par y el ruido que producía la máquina eléctrica.

El control vectorial se basa en la transformación del sistema trifásico estacionario constituido por las corrientes del estator I_A , I_B , e I_C , en un sistema bifásico rotatorio que se representa en un plano imaginario d, q y que gira a la frecuencia síncrona. El eje “q” es el eje del par motor y es a lo largo del cual el campo magnético del estator se debe desarrollar. Mientras que el eje “d” se refiere al eje directo del flujo del rotor.

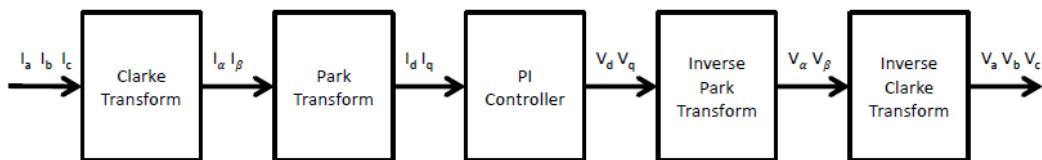


Figura 17: Transformaciones que se llevan a cabo en el control FOC. Fuente: e-Publications@Marquette.

De este modo se consigue desacoplar las componentes de flujo y par, pudiendo controlar la máquina como si de una máquina de corriente continua se tratase. (28)

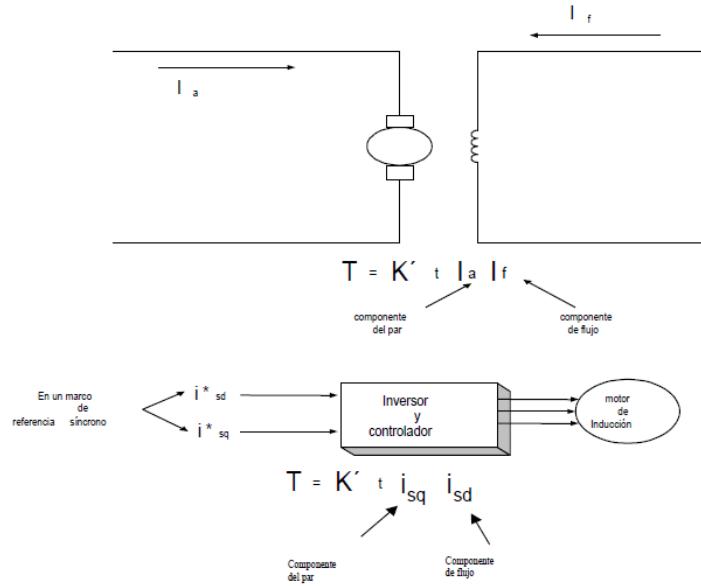


Figura 18: Analogía entre el control de una máquina AC (p.ej. ACIM) y el control de una máquina DC.⁷ Fuente: Máquinas eléctricas: Técnicas modernas de control.

En la máquina de corriente continua, si despreciamos el efecto de saturación y de la reacción de armadura, tenemos que la expresión del par electromagnético nos queda como:

$$T = K'_t \cdot I_a \cdot I_f \text{ (Nm)}$$

Donde:

I_a = Corriente de armadura para el devanado de campo (A).

I_f = Corriente de flujo magnético (A).

K'_t = Constante de proporcionalidad.

Las corrientes I_a e I_f son consideradas como dos vectores ortogonales o desacoplados. A la hora de realizar el control de la máquina DC, la corriente I_f se mantiene en un valor constante y el par del motor se regula mediante la variación de la corriente de armadura (I_a).

Por medio del control FOC y de las transformaciones que en él se llevan a cabo, podemos realizar un tipo de regulación en las máquinas AC (y en nuestro caso del motor BLDC) análogo al que se lleva a cabo en las máquinas de corriente continua.

⁷ Los métodos de control FOC son generales y se pueden aplicar tanto a la máquina de inducción como a las máquinas sincrónicas.

3.1. LOS PRINCIPIOS DEL FOC. TRANSFORMACIÓN DE COORDENADAS.

A través de las transformaciones de coordenadas es posible controlar los valores de par y flujo invariables en el tiempo a través de lazos de control PI (proporcional Integral). En este apartado explicaremos las bases del control automático PI, las bases del control FOC y las transformaciones que en él se llevan a cabo.

El proceso del FOC comienza con la medición de las corrientes trifásicas que alimentan a la máquina. Como es conocido, la suma de estas corrientes pertenecientes al sistema trifásico es igual a cero, es por ello por lo que normalmente cuando se realiza este tipo de control en una máquina como es el caso del PMSM (Permanent Magnets Synchronous Motor) solo se necesita medir dos corrientes y la tercera es calculada mediante:

$$I_A + I_B + I_C = 0$$

No obstante, debido a las características en la alimentación de nuestro motor, el BLDC, es decir, alimentándolo entre dos bobinas y dejando la tercera al aire para la medición de la f.c.e.m., se hace necesario medir las corrientes en estas tres fases ya que estas no están balanceadas.

3.1.1. TRANSFORMADA DE CLARKE.

La primera transformada de la que consta el proceso es conocida como la transformada de Clarke (Figura 19). Ésta convierte el sistema de corrientes trifásico bidimensional referenciado al estator en un sistema de dos ejes estacionario con la misma referencia (el estator).

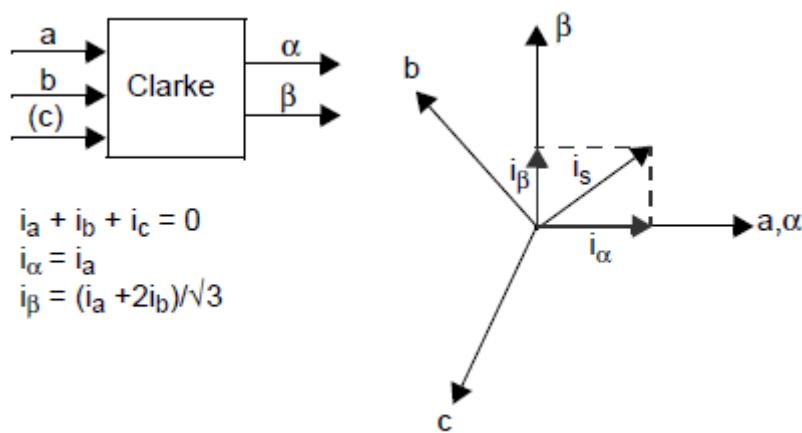


Figura 19: Transformación de Clarke. Fuente: Microchip.

3.1.2. TRANSFORMADA DE PARK.

La transformada de Park (Figura 20) se encarga de convertir el sistema bifásico representado en el sistema de dos ejes (α , β) estacionario en un sistema bifásico rotatorio que gira a la velocidad del campo magnético del rotor.

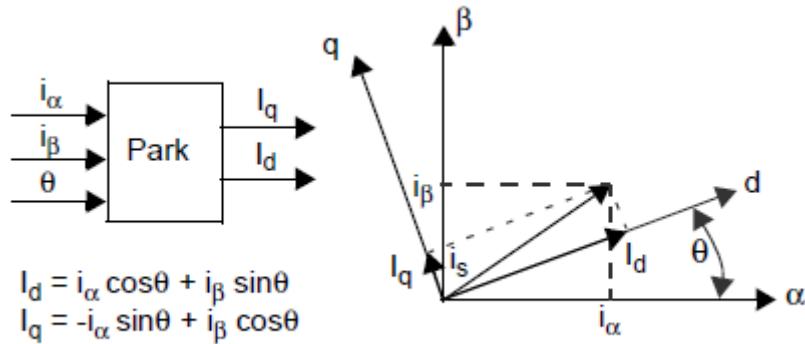


Figura 20: Transformada de Park. Fuente: Microchip.

Este nuevo sistema es el representado por los ejes d-q. El ángulo θ representa el ángulo del rotor.

3.1.3. EL CONTROL PI.

En esta sección se va a explicar de manera sencilla el control automático PID (29), ya que este es una parte fundamental del control FOC y de casi cualquier proceso industrial donde haya que controlar variables como la velocidad, temperatura, presión, etc. Es por este motivo por el cual se ha creído importante destacarlo y exponerlo brevemente.

El control PID es una forma de control en bucle cerrado que busca un ajuste en el control para que el sistema proporcione una respuesta adecuada. Este está constituido por tres elementos o acciones que tratan el error de manera diferente, la acción proporcional, la acción integral y la acción derivativa, y es mediante las diferentes combinaciones de estas acciones (PI, PD, PID) con lo que obtenemos un controlador más adecuado según el tipo de aplicación. El ajuste de los parámetros del PID se puede realizar de manera empírica a través de la modificación de los valores de sus ganancias.

El objetivo del sistema es reducir el error al máximo intentando que este llegue a 0. Dicho error podemos definirlo, como se aprecia en la Figura 21, como la diferencia entre el valor de la consigna menos el valor real a la salida del sistema.

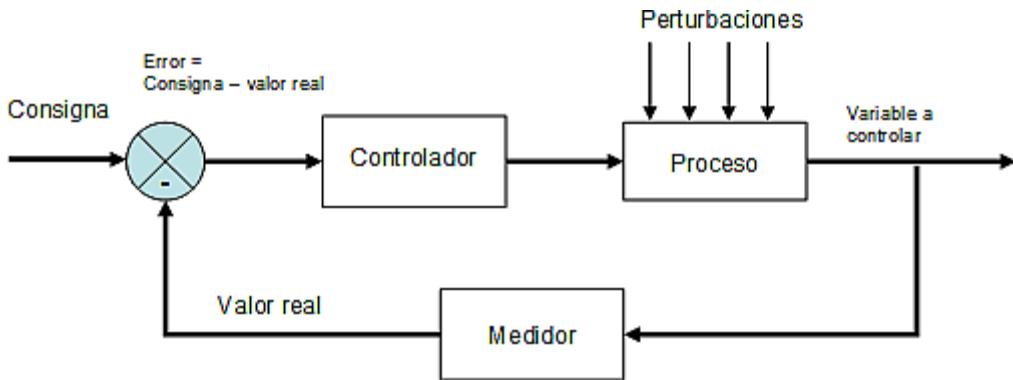


Figura 21: Representación de un sistema en lazo cerrado. Fuente: tecingenieriaclassico.blogspot.com.

La acción proporcional (P) tiende a minimizar el error del sistema. Su manera de actuar depende del error de salida, es decir, si el error es grande la respuesta también lo será, si por el contrario el error es pequeño, la respuesta que esta acción llevará a cabo será acorde a ella.

La propia acción proporcional tiene un defecto denominado “offset”, este es un pequeño error muy cercano a cero pero que no llega a desaparecer y se traduce en un error en estado estable que el controlador P no es capaz de resolver por sí solo.

$$u_P(t) = K_p \cdot e(t)$$

K_p = Ganancia proporcional.

En el control integral o acción I, la salida es proporcional a la acumulación de la señal de error durante el tiempo, es decir, a la integral de este. Se usa para eliminar errores pequeños en estado permanente.

El principal problema que incluye la acción integral es que añade una componente de inercia que puede llevar al sistema a una cierta inestabilidad.

$$u_I(t) = K_I \cdot \int_0^t e(t) \cdot dt$$

K_I = Ganancia integral.

En la acción derivativa o diferencial (D) la respuesta de salida será proporcional a la velocidad con la que cambia el sistema. Esta acción predice la respuesta del sistema y actúa en consecuencia para que dicha respuesta sea lo más precisa posible, evitando de esta manera sobreoscilaciones debido a inercias.

La parte negativa de esta acción es que como actúa en función de la velocidad a la que cambia el sistema, si por cualquier motivo se produce un pequeño error muy rápido, la acción llevada a cabo puede ser excesiva. O, por otra parte, si tenemos un error constante, su derivada es 0 y

por tanto la acción D no es capaz de solventarlo por si sola, de modo que siempre irá acompañada de otra u otras acciones (P y/o I).

$$u_D(t) = k_D \cdot \frac{de(t)}{dt}$$

K_D = Ganancia diferencial.

Como ejemplo, en el control FOC se implementa mediante las acciones PI, sin la acción derivativa (D) debido al reducido tiempo con el que se producen cambios en la velocidad del motor. Ya que el uso de la acción D podría causar severos problemas al algoritmo de control.

3.1.4. TRANSFORMADA INVERSA DE PARK

Después del control PI, tenemos dos vectores de tensión rotatorios que giran a la velocidad del flujo del estator representados en el plano d-q. La transformada inversa de Park (Figura 22) convierte este sistema bifásico rotatorio en un sistema bifásico estacionario representado por los ejes α-β.

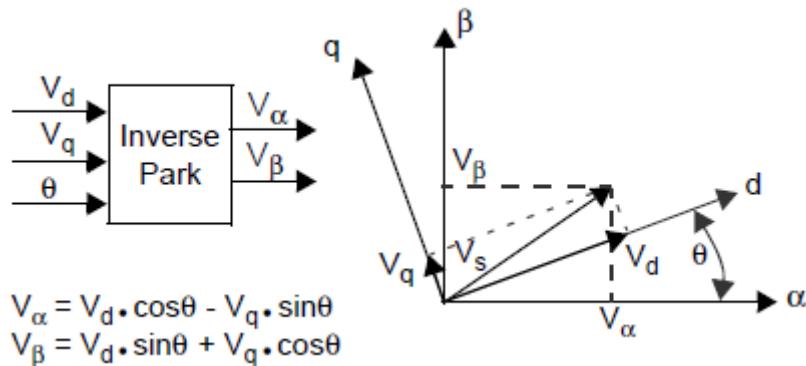


Figura 22: Transformada inversa de Park. Fuente. Microchip.

3.1.5. TRANSFORMADA INVERSA DE CLARKE.

Una vez tenemos el sistema bifásico estacionario α-β, tenemos que convertirlo en un sistema estacionario trifásico referenciado al estator para poder de esta manera alimentar a la máquina. Dicha conversión se realiza por medio de la transformada inversa de Clarke (Figura 23).

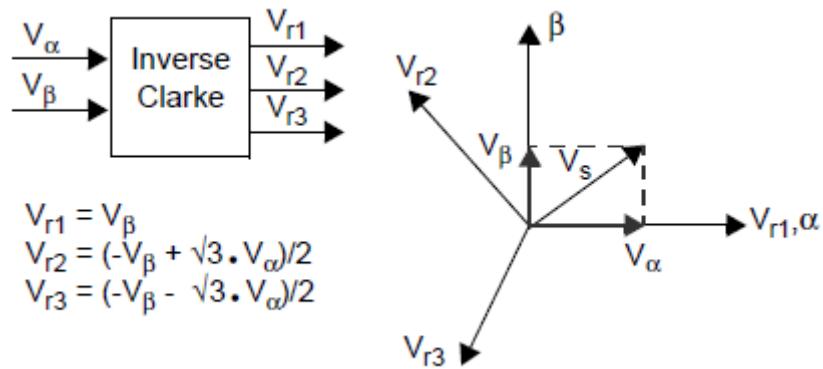


Figura 23: Transformada inversa de Clarke. Fuente: Microchip.

3.1.6. SVM O SVPWM. MODULACIÓN ESPACIO VECTORIAL.

La última parte del proceso consiste en la generación de la señal PMW (Pulse Width Modulation) que finalmente será la encargada de controlar el motor.

La salida del inversor que proporciona la alimentación al motor puede tener, si tenemos en cuenta que tiene tres fases y que estas pueden ser conectadas al positivo (+) o al negativo (-) un total de $2^3=8$ estados posibles. Dos de estos estados son las tres fases conectadas al positivo y las tres fases conectadas al negativo, no habiendo diferencia de potencial entre los bobinados y, por tanto, considerándose estados nulos. Esto nos deja con seis estados, que son los 6 (steps) que se usan para controlar el giro del motor.

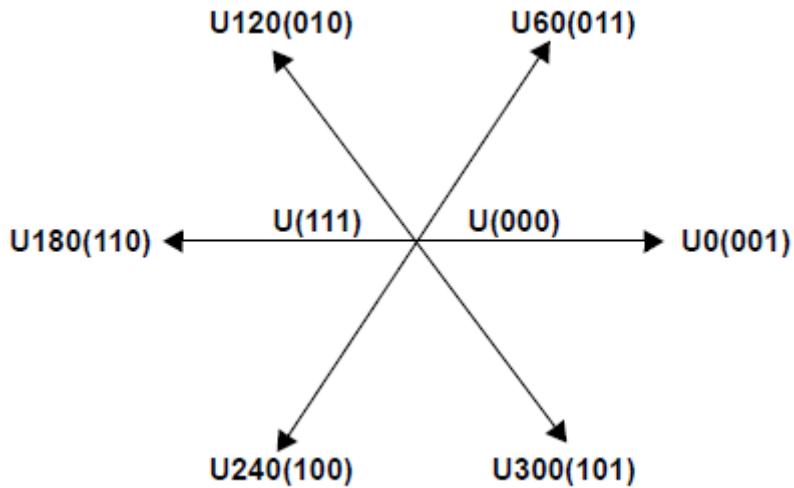


Figura 24: Representación espacial de los 6 vectores + 2 vectores nulos. Fuente: Microchip.

La modulación SVM (Space Vector Modulation) o SVPWM permite la composición de cualquier vector del espacio por medio de la suma de dos de los vectores adyacentes que podemos ver en la Figura 24. Quedando dicha composición como vemos en la Figura 25.

$$T_0 = \text{Null Vector}$$

$$T = T_1 + T_2 + T_0 = \text{PWM Period}$$

$$U_{\text{OUT}} = (T_1/T \cdot U_0) + (T_2/T \cdot U_{60})$$

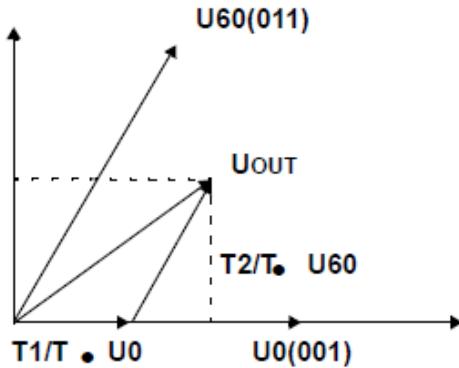


Figura 25: Composición vectorial. Fuente: Microchip.

Fase C	Fase B	Fase A	V_{ab}	V_{bc}	V_{ca}	V_{ds}	V_{qs}	Vector
0	0	0	0	0	0	0	0	$U(000)$
0	0	1	V_{DC}	0	$-V_{DC}$	$2/3V_{DC}$	0	U_0
0	1	1	0	V_{DC}	$-V_{DC}$	$V_{DC}/3$	$V_{DC}/3$	U_{60}
0	1	0	$-V_{DC}$	V_{DC}	0	$-V_{DC}/3$	$V_{DC}/3$	U_{120}
1	1	0	$-V_{DC}$	0	V_{DC}	$-2/3V_{DC}$	0	U_{180}
1	0	0	0	$-V_{DC}$	V_{DC}	$-V_{DC}/3$	$-V_{DC}/3$	U_{240}
1	0	1	V_{DC}	$-V_{DC}$	0	$V_{DC}/3$	$-V_{DC}/3$	U_{300}
1	1	1	0	0	0	0	0	$U(111)$

Tabla 5: Posibles estados del inversor en la modulación SVPWM. Fuente: Microchip. (29)

3.2. CONTROL FOC DIRECTO E INDIRECTO.

El desarrollo del algoritmo de control por campo orientado (FOC) requiere de la obtención del vector de flujo del rotor que viene expresado por una magnitud y un ángulo. Según la manera con que obtenemos dicho vector, podemos diferenciar entre dos modelos, el método de control directo y el método indirecto.

En el control FOC directo se calcula la magnitud del vector flujo. Este modelo dota de mayor precisión al sistema de control de par que los métodos de control escalares, sin embargo, este precisa de sensores para el control de velocidad del rotor y de sensores de campo magnético para proporcionar la información pertinente a los algoritmos de control de la máquina.

Este tipo de control se enfrenta principalmente al problema de su total dependencia de los sensores y de las medidas que estos realizan sobre los distintos parámetros del motor.

Por otro lado, tenemos que el control FOC indirecto estima el ángulo de fase del rotor eliminando así la necesidad de un sensor adicional para dicha tarea, pero aumentando la complejidad y el tiempo de computación del algoritmo de control del motor.

3.2.1. MEDICIÓN DE POSICIÓN.

Tanto en el método de control directo como en el método indirecto es indispensable el conocimiento de la posición del estator para que el algoritmo de control FOC funcione de manera correcta. Para ello se usan encoders que además de identificar la posición, y con ello la velocidad de giro del rotor de la máquina, son capaces de conocer el sentido de giro del motor (Figura 26).

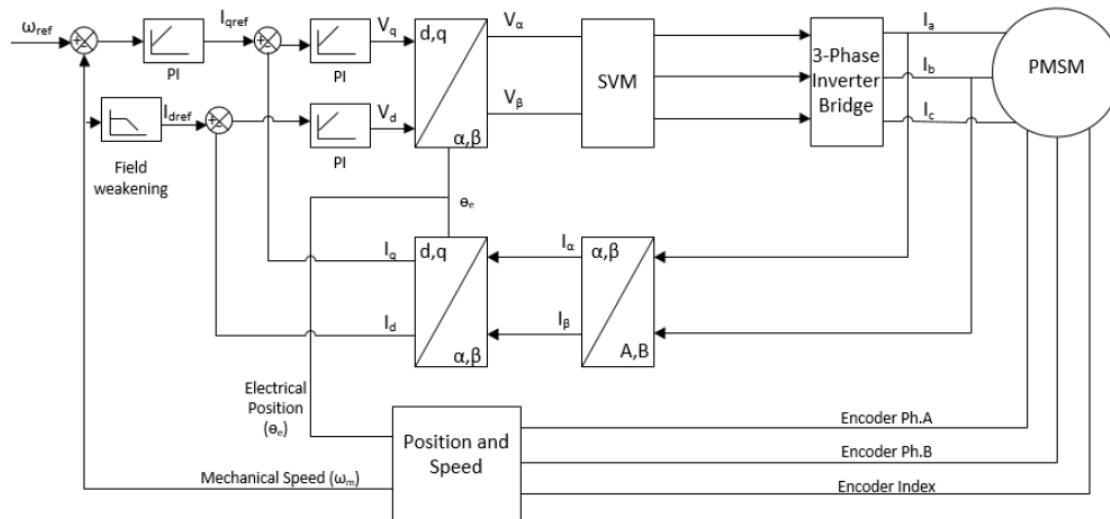


Figura 26: Diagrama de bloques del control FOC con sensores de un PMSM. Fuente: Microchip. (30)

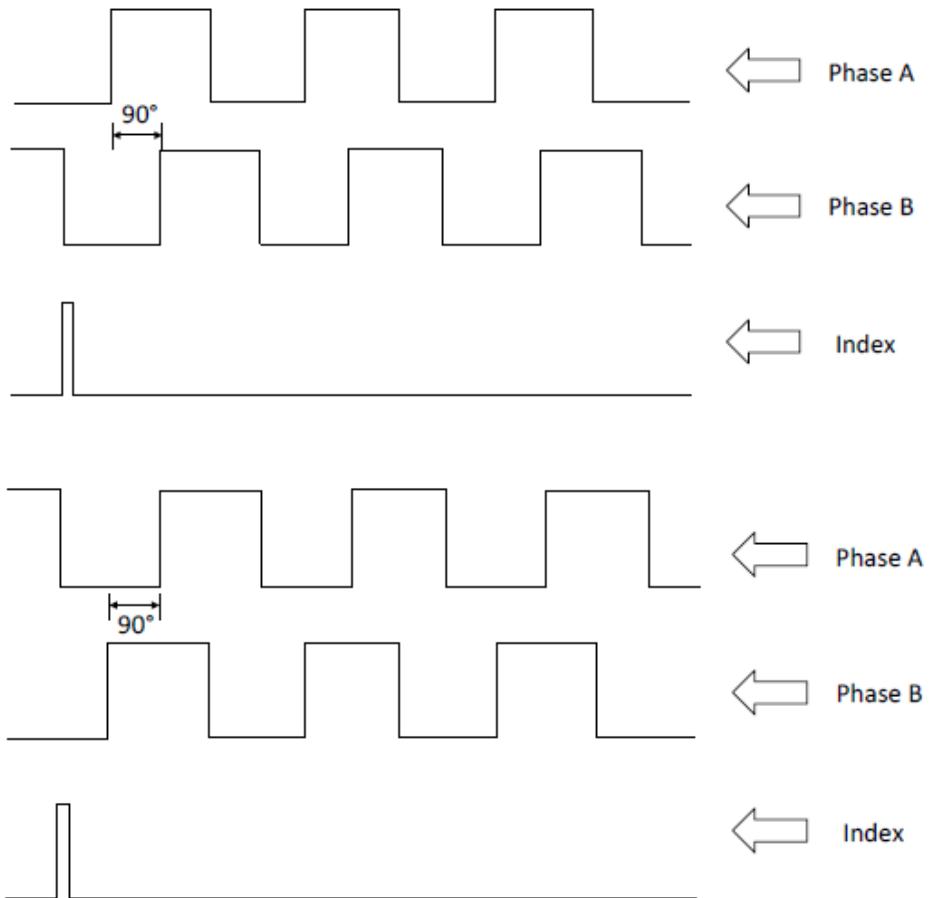


Figura 27: Tren de pulsos generado por el encoder de un motor. Fuente: Microchip.

En la Figura 27 observamos un tren de pulsos generado por un encoder adherido al eje de un motor eléctrico. Vemos que dicho encoder genera dos trenes de pulsos que dependiendo de cuál precede a cuál podemos conocer el sentido de giro del rotor. Además, la velocidad también es un parámetro conocido por el algoritmo de control.

Algunos encoders poseen una señal conocida como “Index” que nos ayudan a conocer de manera más sencilla la posición del rotor en el espacio.

Y por último cabe puntualizar que cuanto mayor es el número de pulsos que genera un encoder más alta es la precisión con la que identificamos la posición del rotor.

3.3. CONTROL FOC SIN SENSORES.

En el método de control FOC sin sensores o Sensorless FOC conseguimos la eliminación total de los sensores necesarios en los tipos de control anteriores, lo que reduce el coste general del sistema a disponer para el control y aumenta la fiabilidad del algoritmo. Pero a su vez, este modo del control vectorial incrementa su complejidad y aumenta también el coste del controlador en sí.

Para eliminar la necesidad de los sensores, la información necesaria para llevar a cabo el control de la máquina se extrae de las tensiones y corrientes a través de los terminales del motor.

3.3.1. MODELO DEL MOTOR.

Para conocer la posición del motor sin el uso de sensores es necesario usar un modelo de cálculo, dicho modelo es el circuito equivalente del BLDC.

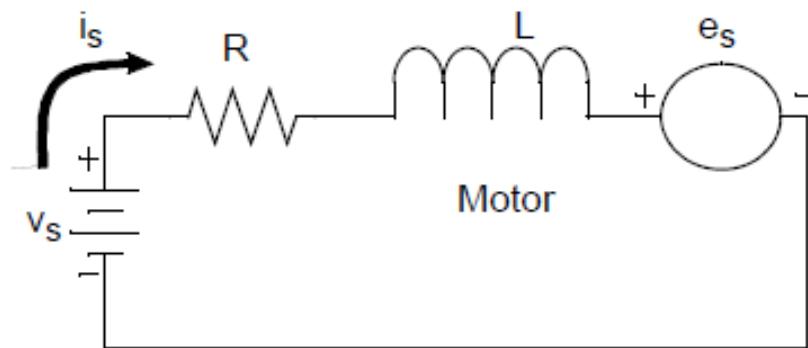


Figura 28: Modelo del motor BLDC. Fuente: Microchip.

En la Figura 28 podemos ver el modelo del motor BLDC, que coincide con el del motor PMSM y a su vez con el del motor DC convencional. En dicho esquema encontramos una resistencia, cuyo valor equivale a la resistencia de los conductores de los bobinados, además de una bobina en representación de los efectos de los propios bobinados. El último elemento sería una fuente de tensión que se opone a la tensión principal de alimentación, es decir, la tensión en bornes del motor y que representa la fuerza contraelectromotriz que se genera en la máquina eléctrica.

Ahora bien, si pensamos en los motores PMSM, sabemos que hay una relación entre la posición del rotor y la f.c.e.m. inducida, por lo que podríamos pensar en usar esta como método para conocer la posición del motor. Pero en el control FOC nos encontramos con el inconveniente de que las tres fases del motor son controladas a lo largo de todo el ciclo, por lo que se hace necesario buscar otro método para determinar la posición del rotor de la máquina. (31) Y dicho método es el que obtenemos a partir del modelo presentado. El citado modelo puede ser expresado de manera matemática por medio de la ecuación:

$$v_s = R \cdot i_s + L \cdot \frac{d}{dt} \cdot i_s + e_s$$

Donde:

v_s =Tensión de alimentación del motor (V).

R =Resistencia de fase (Ω). Si es medida entre dos fases tendrá que ser dividida entre 2.

i_s =Corriente de fase del motor (A).

L =Inductancia de bobinado (H).

e_s =Fuerza contraelectromotriz generada en el motor (V).

Si despejamos de esta ecuación la derivada de la corriente, nos queda:

$$\frac{d}{dt}i_s = \frac{1}{L_s}(v_s - e_s) - \frac{R \cdot i_s}{L}$$

Y si expresamos dicha ecuación en el dominio del tiempo:

$$\begin{aligned}\frac{i_s(n+1) - i_s(n)}{T_s} &= \left(-\frac{R}{L}\right) \cdot i_s(n) + \frac{1}{L}(v_s(n) - e_s(n)) \\ i_s(n+1) &= \left(1 - T_s \cdot \frac{R}{L}\right) \cdot i_s(n) + \frac{T_s}{L}(v_s(n) - e_s(n)) \\ F &= 1 - T_s \cdot \frac{R}{L} \\ G &= \frac{T_s}{L}\end{aligned}$$

Donde:

T_s = Periodo de control (s).

Los valores de F y G se calculan a partir de la resistencia y la inductancia de fase del motor y del período de control T_s .

Ahora bien, si pensamos en cómo se alimenta un motor BLDC observamos que, en cada paso (step) o conmutación, son dos las fases del motor alimentadas quedando la tercera al aire. Es por esto por lo que el motor brushless permite el control FOC sin sensores con un menor coste al usar la f.c.e.m. como método para conocer la posición/velocidad del rotor de la máquina.

Si observamos la Figura 29, vemos que las señales producidas por la inducción de la fuerza contraelectromotriz (líneas discontinuas) en los diferentes bobinados del motor nos permiten obtener la misma información que si hubiéramos dispuesto en la máquina sensores de efecto Hall (líneas continuas) para conocer la posición de su rotor y realizar de esta manera la conmutación del puente de potencia en el instante adecuado.

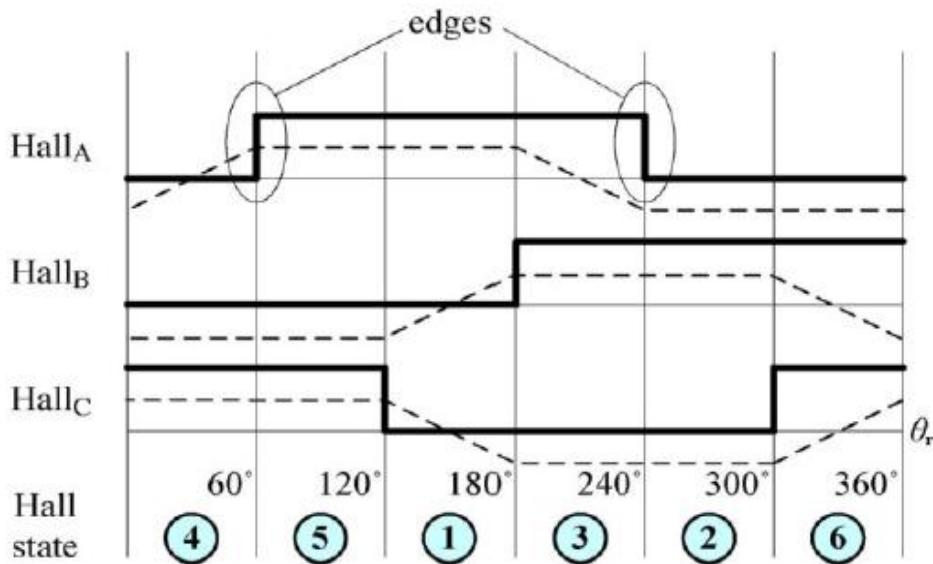


Figura 29: Señales de sensores de efecto Hall y señales producidas por la f.c.e.m. Fuente: Researchgate.

La principal desventaja con la que cuenta la operación por medio del uso de la f.c.e.m. como método para conocer la posición/velocidad del motor es que debido a que esta depende directamente de la velocidad de giro del motor, la operación a bajas velocidades está limitada. Esto es debido a la imposibilidad de obtener la información correcta para la conmutación por debajo de un cierto valor de velocidad. (32)

3.4. DEBILITAMIENTO DE CAMPO.

El debilitamiento de campo se basa en dar un valor negativo en el eje “d” a la corriente del estator, que tiene la función de debilitar el flujo del entrehierro.

En un motor, la caída de tensión se produce en la resistencia y reactancia de los bobinados, y el resto se usa para contrarrestar la f.c.e.m. Dicha f.c.e.m., como ya hemos apuntado previamente, es proporcional a la velocidad de giro del motor y además lo es a la constante de tensión $K\Phi$. Una disminución del flujo en el entrehierro se traduce en una disminución del par, sin embargo, para aquellas ocasiones en las que el motor tenga que funcionar por encima de su velocidad nominal puede ser útil la función de debilitamiento de campo.

En la Figura 30 vemos como a partir de la velocidad nominal del motor (3000 r.p.m.) si iniciamos el proceso de debilitamiento de campo, podemos seguir ganando velocidad con el motor.

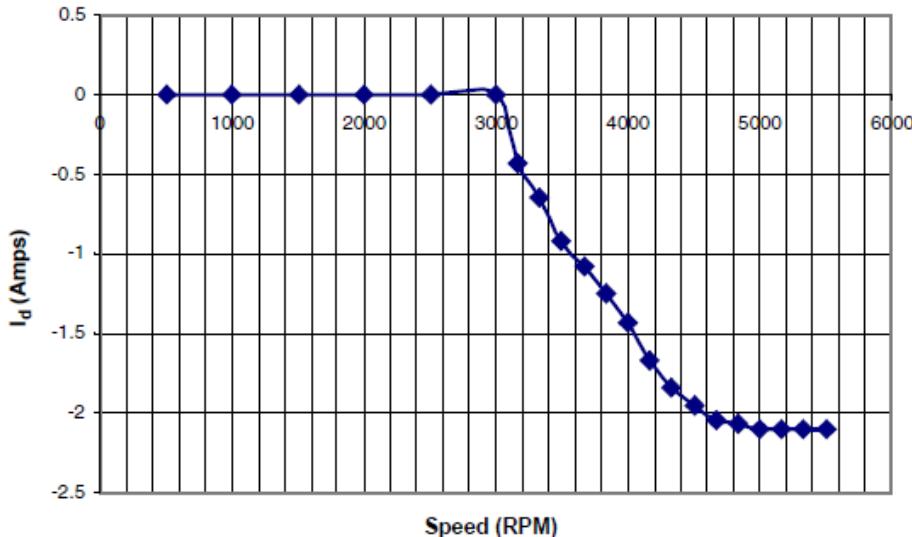


Figura 30: Curva de debilitamiento de campo. Fuente: Microchip.

3.5. MODO DE FUNCIONAMIENTO.

3.5.1. MODO DE VELOCIDAD.

En el modo de velocidad se toma la velocidad del motor y esta se compara con la velocidad de referencia establecida a través del controlador PI.

En este modo de operación, el rotor se mantiene girando a una velocidad constante independientemente de la variación de la carga en el eje de la máquina. Debido a ello, el consumo de corriente de la máquina puede variar en función de una mayor o menor carga.

3.5.2. MODO DE PAR.

En este modo de funcionamiento se realiza un control en el par. Se fija el consumo de corriente por parte de la máquina y el nivel de torque desarrollado. De esta forma, ante posibles variaciones de la carga en el motor, la velocidad del rotor no será constante.

3.6. ARRANQUE DEL MOTOR.

En el control FOC sin sensores se usa la f.c.e.m. como método para conocer la posición del motor, cosa que ya se ha comentado previamente. Es por ello por lo que se necesita de una mínima velocidad para que este método sea efectivo. Para conseguir dicha velocidad se ha de alimentar al motor con el ángulo estimado correcto. El motor es acelerado de manera constante y el algoritmo controla las corrientes I_d e I_q , mientras que el ángulo θ se incrementa en base a la aceleración.

En la Figura 31 vemos una subrutina de arranque del motor, esta provee a la máquina de un par de arranque constante hasta el final de la rampa de aceleración inicial. Una vez el motor ha superado dicha rampa el controlador cambia al control FOC sensorless, debido a que la velocidad ya ha superado el mínimo necesario para que dicho controlador pueda servirse de la f.c.e.m. e identificar la posición del motor.

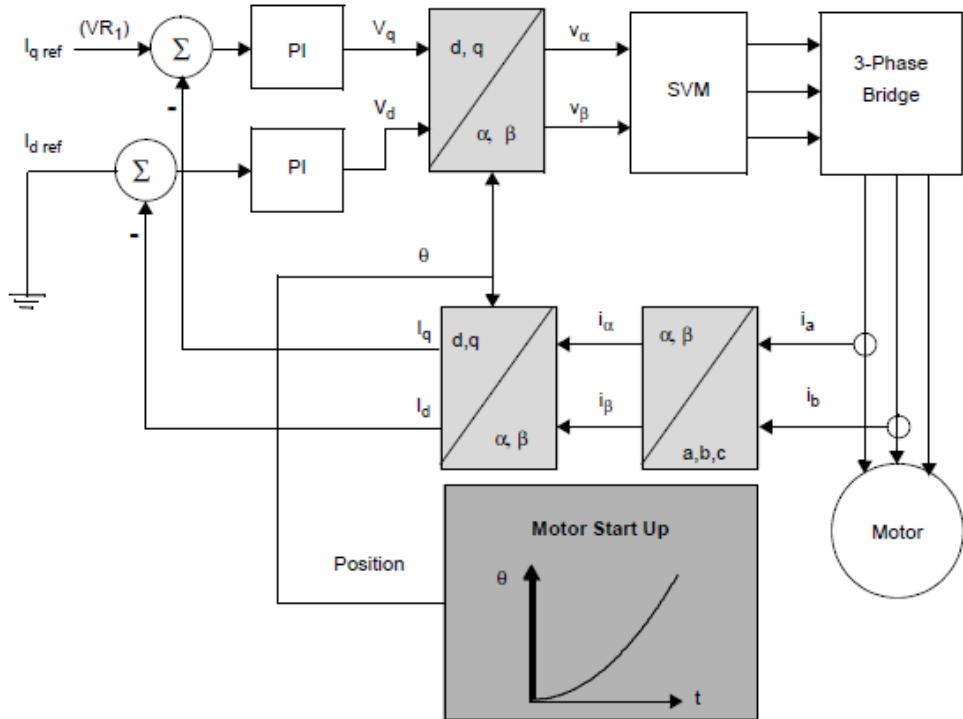


Figura 31: Diagrama de bloques del arranque de un motor PMSM. Fuente: Microchip.

3.7. APLICACIONES DEL CONTROL FOC.

El control orientado de campo puede ser usado en múltiples aplicaciones ya que puede aplicarse a diferentes tipos de motores, al motor de inducción (ACIM), al motor sincrónico de imanes permanentes (PMSM) y por supuesto al protagonista de este proyecto, al motor brushless de corriente continua (BLDC).

El FOC se puede usar en múltiples aplicaciones industriales donde se requiera de un control másiable y de mayor eficiencia energética. Siendo algunas aplicaciones las que se señalan: (33)

- Control de bombas y ventiladores para variar la velocidad de manera eficiente.
- Control de cintas transportadoras consiguiendo por medio del FOC un desarrollo del par más suave.
- Usado en aplicaciones de tracción eléctrica mejorando el par desarrollado y la eficiencia energética en aquellas aplicaciones donde la fuente de alimentación es una batería.

4. CONTROL FOC PARA UN MOTOR BLDC.

En este punto del trabajo vamos a realizar la implementación del control orientado de campo para un motor brushless de corriente continua. Dicho control se va a desarrollar con la ayuda del kit “STM32 Nucleo Pack for 3-phase, low-voltage and low-current motor control” del fabricante STMicroelectronics (34) (ANEXO 1).



Figura 32: Kit de desarrollo de control FOC y 6 steps. Fuente: ST.com

El kit mostrado en la Figura 32 consta de la placa de control y de potencia, de un pequeño motor brushless como los que podemos encontrar en los drones recreativos, y una fuente de alimentación tipo enchufe de 12V con una corriente máxima de 2 A para suministrar energía a la etapa de potencia del sistema. La potencia de dicha fuente es importante debido a que es la que va a limitar el amperaje que podemos entregar a la placa de control, con mayor exactitud a su shield⁸ de potencia.

Además, vamos a realizar una serie de pruebas mediante la implementación del control de velocidad para poder observar cómo responde el motor ante diferentes consignas de velocidad y rampas de aceleración.

⁸ La shield o placa de potencia es la parte del circuito electrónico que se encarga de controlar y suministrar la tensión e intensidad que percibe el motor.

4.1. DESCRIPCIÓN DEL HARDWARE.

En este apartado con el que vamos a tratar a continuación se realiza una presentación y descripción del hardware que se ha utilizado para la realización del presente proyecto. Veremos con detalle los elementos que constituyen el kit de STMicroelectronics que nos ha permitido hacer las pruebas y ensayos pertinentes para conocer de manera más didáctica el control orientado de campo o control vectorial.

4.1.1. MICROCONTROLADOR STM32F302R8

El STM32F302R8 es un microcontrolador de STMicroelectronics de 32 bits. Este constituye la etapa de control del montaje. Debido a su bajo coste, su gran capacidad de cómputo y a la gran cantidad de información y sobre todo, de herramientas que ST nos provee, hace de este sistema una plataforma idónea para el desarrollo de nuestro proyecto y de una gran variedad de aplicaciones distintas.

Debido a la nombrada capacidad de cómputo podemos realizar un control SVPWM con un mayor número de cálculos en cada período, lo que se traduce en un menor rizado del par del motor.

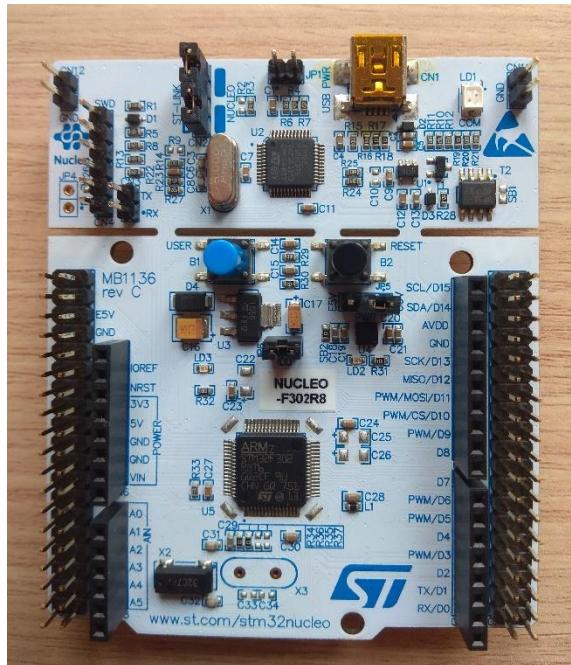


Figura 33: Microcontrolador STM32F302R8. Fuente: Archivo del autor.

En la Figura 33 vemos el microcontrolador STM32F302R8 usado para la realización de este proyecto, en este caso la placa con 64 pines.

4.1.2. X-NUCLEO-IHM07M1.

La shield o placa de expansión X-NUCLEO-IHM07M1 es la encargada de suministrar la potencia a motores brushless trifásicos de baja potencia y tensión. La placa está basada en el driver L6230 (35) que cuenta con protección térmica y contra sobre corrientes. Además, gracias a la medida de corriente que realiza de forma independiente, este driver está optimizado para el control por 6 steps y para el control orientado de campo.

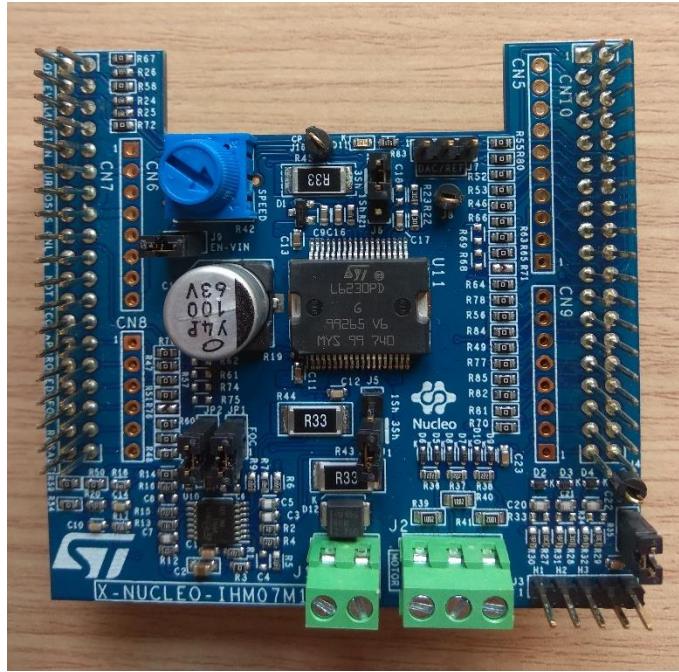


Figura 34: Shield de potencia X-NUCLEO-IHM07M1. Fuente: Archivo del autor.

La placa tiene un conector para alimentación entre 8 y 48V, con una corriente de hasta 2.8 amperios pico (Apk), siendo capaz de controlar motores BLDC y motores PMSM. Además, para la medida de corriente cuenta con dos posibles tipologías, 1 Shunt o 3 Shunt.

Como observamos en la Figura 34, esta cuenta con un potenciómetro incorporado para poder realizar el propio control de velocidad desde el kit sin necesidad de usar ningún tipo de interfaz de control desde un ordenador.

4.1.3. FUENTE DE ALIMENTACIÓN.

La encargada de entregar potencia a la placa va a ser una fuente de alimentación tipo enchufe. Esta tiene una tensión nominal de 12V con una corriente nominal de hasta 2A. Debido a ello, se deberá tener en cuenta a la hora de realizar las pruebas de no sobrepasar dicha corriente pues podríamos dañar la fuente de manera irreparable.

4.1.4. MOTOR BULLRUNNING BR2804-1700kv¹.

El motor BullRunning BR2804 va a ser la máquina que vamos a someter a ensayo. Dicho motor es el que ST provee en su kit. Para conocer de manera más detallada el motor, se presenta a continuación en la Tabla 6 su ficha de características:

PARÁMETROS DEL MOTOR	
MOTOR	Bull Running BR2804
KV (kv ⁻¹)	1700
V _{DC} (V)	12
I _{MAX} (A)	5
p POLOS	7
RPM _{MAX} (r.p.m)	19000

Tabla 6: Características del motor BR-2804.

Si volvemos atrás, en la Figura 10 podemos ver una imagen del motor en cuestión.

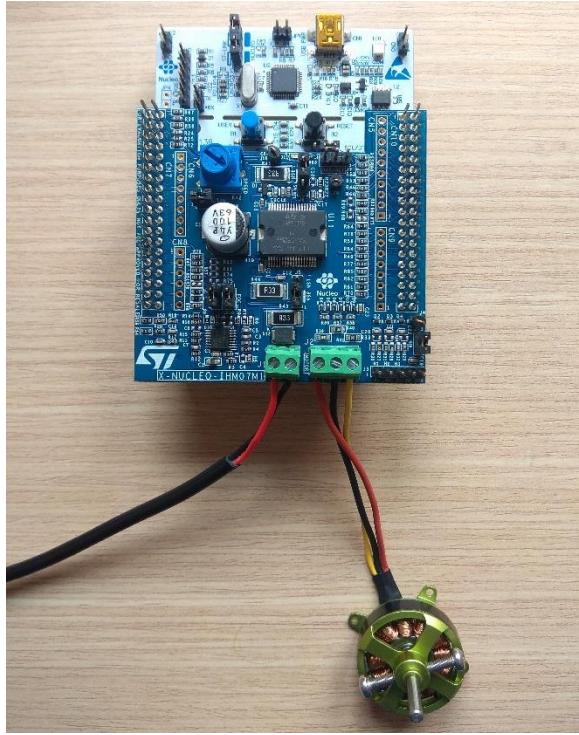


Figura 35: Disposición del kit de control. Fuente: Archivo del autor.

En la Figura 35 podemos observar la disposición de la placa de control junto con la placa de expansión y el motor. Nótese la disposición de los cables en la placa pues es de suma

importancia⁹ que sean conectados de la manera mostrada, tanto los de la fuente de alimentación como los del motor BLDC.

4.2. DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE.

En este apartado se exponen los diferentes programas que se han usado para la configuración del control en la placa. Estos programas son principalmente obtenidos de dos fuentes, por un lado, los programas oficiales de ST, necesarios para la parametrización del motor y su control. Y, por otro lado, el IAR Embedded Workbench de la empresa IAR Systems.

4.2.1. MOTOR PROFILER.

El programa “Motor Profiler” (36) de ST nos ayuda a identificar los diferentes parámetros que caracterizan a un motor eléctrico. En particular, este programa sirve para parametrizar motores brushless con ciertos requisitos que más adelante se exponen. Este programa lo podemos descargar de la web de ST y su interfaz destaca por su simplicidad.

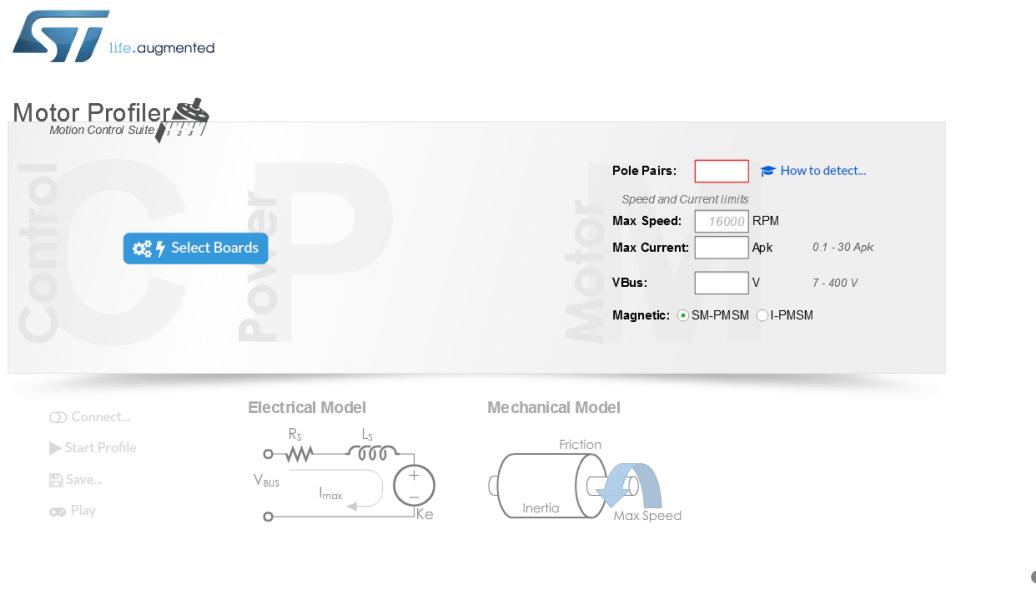


Figura 36: interfaz del programa Motor Profiler. Fuente. Motor Profiler, Autor.

En la Figura 36 vemos los valores de entrada que tenemos que aportar al programa, siendo el número de pares de polos del motor de gran importancia para la correcta parametrización del motor en cuestión. Debemos introducir la velocidad, la corriente y la tensión DC máxima¹⁰ a la que vamos a alimentar el motor además de la tipología de motor. En nuestro caso SM-PMSM,

⁹ Véase página 8 del manual de usuario UM1945 (ANEXO 1).

¹⁰ La tensión no es necesario introducirla pues el propio programa la mide y la dispone a modo de parámetro de salida.

que hace referencia a la disposición de los imanes en la superficie del rotor (Surface Mounted-PMSM).

Por último, y de gran importancia es la selección de la placa de control y de la placa de potencia que vamos a usar en nuestra aplicación, en nuestro caso la placa NUCLEO-F302R8 junto con la shield de potencia X-NUCLEO-IHM07M1.

El motor que vamos a usar, el Bull Running BR2804, ya lo vimos con anterioridad en la Figura 10.

Ahora bien, debemos tener en cuenta las características de la fuente de alimentación que vamos a usar, dicha fuente tiene unos valores eléctricos de 12V con una corriente máxima de 2A, lo que deberemos tener en cuenta a la hora de introducir los parámetros máximos en la aplicación.

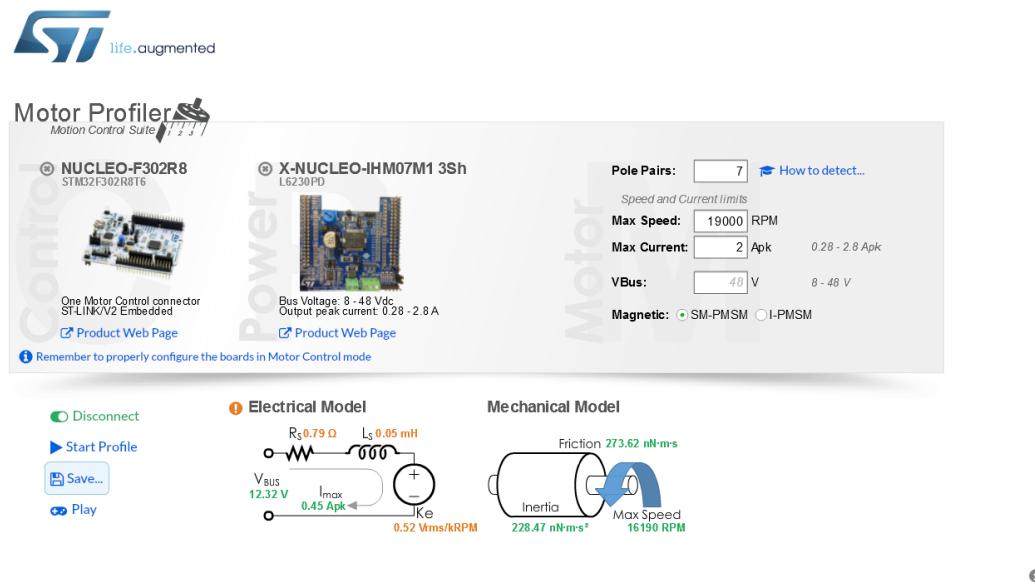


Figura 37: Resultado del ensayo del motor con el Motor Profiler. Fuente: Motor Profiler, Autor.

En la Figura 37 vemos los resultados de los parámetros del motor después de la realización de uno de los cinco ensayos llevados a cabo, dichos parámetros los presentamos a continuación.

MODELO ELÉCTRICO		1	2	3	4	5
	R _s (Ω)	0,65	0,79	0,62	0,76	0,55
	L _s (mH)	0,04	0,05	0,04	0,05	0,04
	K _e (Vrms/kRPM)	0,69	0,52	0,7	0,52	0,7
	V _{BUS} (V)	12,32	12,32	12,32	12,32	12,33
	I _{Apk} (A)	0,45	0,45	0,47	0,46	0,46

Tabla 7: Parámetros eléctricos obtenidos mediante la realización de múltiples ensayos. Fuente: Motor Profiler, Autor.

MODELO MECÁNICO		1	2	3	4	5
	Fricción (nN·m·s)	376,07	273,62	382,45	280,04	389,26
	RPM _{MAX} (r.p.m.)	16240	16190	16580	16540	16330
	Incercia (nN·m·s ²)	297,85	228,47	322,79	235,8	306,74

Tabla 8: Parámetros mecánicos obtenidos mediante la realización de múltiples ensayos. Fuente: Motor Profiler, Autor.

Como podemos observar en la Tabla 7 y en la Tabla 8, se han obtenido diferentes valores de los parámetros al realizar un total de cinco ensayos, y debido a su amplia variación y por ello escasa fiabilidad, se ha de buscar otra solución.

La explicación a dicha variación en los valores nos la aporta ST en el propio programa “Motor Profiler”, y es que dicho programa está optimizado para motores que cuentan con las siguientes características:

- La resistencia de los conductores del estator debe ser mayor a 1Ω , y como podemos observar, aunque no sea una medida fiable, el valor en nuestro motor puesto que no es medido correctamente, es menor. Además, dicho error es fácilmente comprobable con la ayuda de un multímetro.
- La impedancia de los bobinados del motor debe ser superior a 1 mH . En este valor el programa también genera problemas.
- La constante de f.c.e.m. debe ser superior a $1\text{Vrms}/\text{k·r.p.m}$. Este valor genera un defecto en la medida en nuestro motor.

Si tenemos en cuenta lo expuesto es entendible que tengamos dificultades a la hora de obtener medidas precisas con la ayuda del programa de ST. No obstante, las medidas se pueden obtener de otra manera, como por ejemplo midiendo la resistencia de estator con un polímetro o usar un aparato específico para medir inductancias. Y en suma a ello, afortunadamente, en el siguiente programa que usaremos, el “ST MC Workbench” (36), ST ya nos proporciona el perfil del motor BR2804 cargado y con las medidas correctas, que difieren de las proporcionadas por el primer programa fruto de las características de nuestro BLDC.

MODELO ELÉCTRICO	$R_s (\Omega)$	0,11
	$L_s (\text{mH})$	0,018
	$K_e (\text{Vrms}/\text{kRPM})$	0,4
	$V_{BUS} (\text{V})$	12
	$I_{Apk} (\text{A})$	1,2

Tabla 9: Valores eléctricos proporcionados por ST. Fuente: ST MC Workbench.

MODELO MECÁNICO	Fricción (nN·m·s)	437
	RPM_{MAX} (r.p.m.)	15000
	Incercia (nN·m·s²)	348

Tabla 10: Valores mecánicos proporcionados por ST. Fuente: ST MC Workbench.

Si nos fijamos en los valores de la Tabla 9 vemos que difieren en gran medida de los proporcionados por el programa. Además, si observamos la Figura 37 vemos que estos valores nos aparecen en color naranja a modo de advertencia, donde se nos indica los requisitos en los parámetros del motor para que estos puedan ser medidos con precisión.

Por otro lado, vemos que los valores del ensayo mecánico, a pesar de no ser muy precisos sí que aparecen en verde. Esto se debe a que dichos valores pueden ser medidos con mayor precisión independientemente de los parámetros del motor.

Si ahora repetimos el ensayo usando como parámetros de entrada aquellos que han sido usados por ST, entonces sí que obtenemos unos valores similares de los parámetros:

MODELO ELÉCTRICO	R_s (Ω)	0,16
	L_s (mH)	0,01
	K_e (Vrms/kRPM)	0,75
	V_{BUS} (V)	12,28
	I_{Apk} (A)	0,88

Tabla 11: Parámetros eléctrico con valores de entrada similares a los de ST. Fuente: Motor Profiler.

MODELO MECÁNICO	Fricción (nN·m·s)	373,59
	RPM_{MAX} (r.p.m.)	14910
	Incercia (nN·m·s²)	333,62

Tabla 12: Parámetros mecánico con valores de entrada similares a los de ST. Fuente: Motor Profiler.

No obstante, debemos destacar que los valores, por ejemplo, de la resistencia y la inductancia del bobinado no deberían verse afectadas por la variación en los parámetros del ensayo, pues son valores característicos del motor. Es por esto, y teniendo en cuenta las limitaciones del programa ya expuestas que se ha proseguido el proyecto con el perfil del motor proporcionado por ST.

En el caso de haber realizado el ensayo de un motor que cumpliera con los requisitos mínimos para que el programa funcione correctamente, podemos guardar el perfil obtenido para posteriormente usarlo en el programa “Motor Control Workbech” (36).

La propia aplicación nos permite realizar un control bastante simple del motor una vez lo hemos parametrizado. En la Figura 38 vemos el panel de control que nos ofrece el programa, en el cual

tenemos la opción de introducir la aceleración máxima y seleccionar la velocidad de la máquina en el rango de velocidad determinado por “Motor Profiler”.

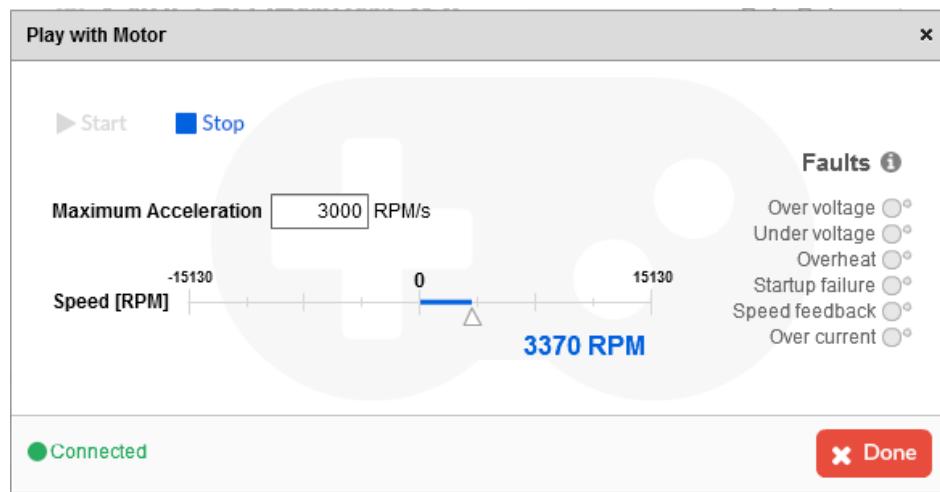


Figura 38: Consola de control integrada en Motor Profiler. Fuente: Motor Profiler, Autor.

Además, en la parte derecha de la interfaz de control observamos una lista de fallos que pueden ser detectados por el software. De este modo, obtenemos una protección ante algunos problemas comunes como pueden ser las sobrecorrientes, evitando así problemas mayores que puedan llevar a la inutilización del hardware.

4.2.2. ST MOTOR CONTROL WORKBENCH.

En este apartado vamos a usar el programa de control de ST “Motor Control Workbench” o “MC Workbench” (36). Con este programa tenemos la posibilidad de configurar una gran cantidad de diferentes parámetros que van a afectar al comportamiento del motor. Además, el programa cuenta con una interfaz de control muy visual con la que poder manejar el motor y hacer diferentes pruebas.

Al abrir el programa, observamos en la esquina superior derecha que también podemos lanzar el programa previamente visto, el “Motor Profiler”, para la identificación previa de los parámetros del motor. También disponemos en la parte inferior de una lista de ejemplos que podemos cargar en el programa con distintas configuraciones que resultan en diferentes comportamientos del motor.

Para proceder en primer lugar con la configuración básica del motor usando el perfil proporcionado por ST, como se aprecia en la Figura 39 debemos configurar un nuevo proyecto y cargar dicho perfil que hemos obtenido a través del programa “Motor Profiler” o, en nuestro caso, cargar el que ya viene incorporado por defecto, el del motor Bull Running BR2804 – 1700kv¹. Además, debemos introducir de nuevo en este programa la placa de control y la placa de potencia que vamos a usar para el control del motor BLDC.

En la Figura 40 observamos como se ha introducido la placa NUCLEO-F302R8 junto con la shield de potencia X-NUCLEO-IHM07M1 en configuración de 3 shunts para la medida de corriente de cada fase. También aparecen los valores característicos del modelo del motor incluidos a partir de los datos del programa.

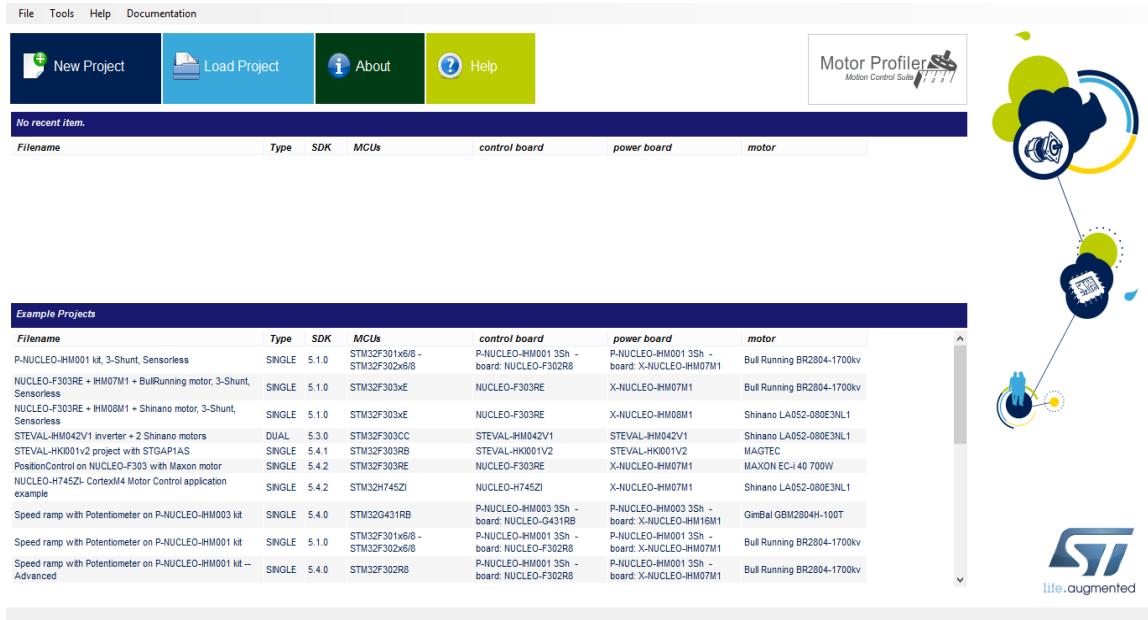


Figura 39: Interfaz del programa MC Workbench. Fuente: ST MC Workbench, Autor.

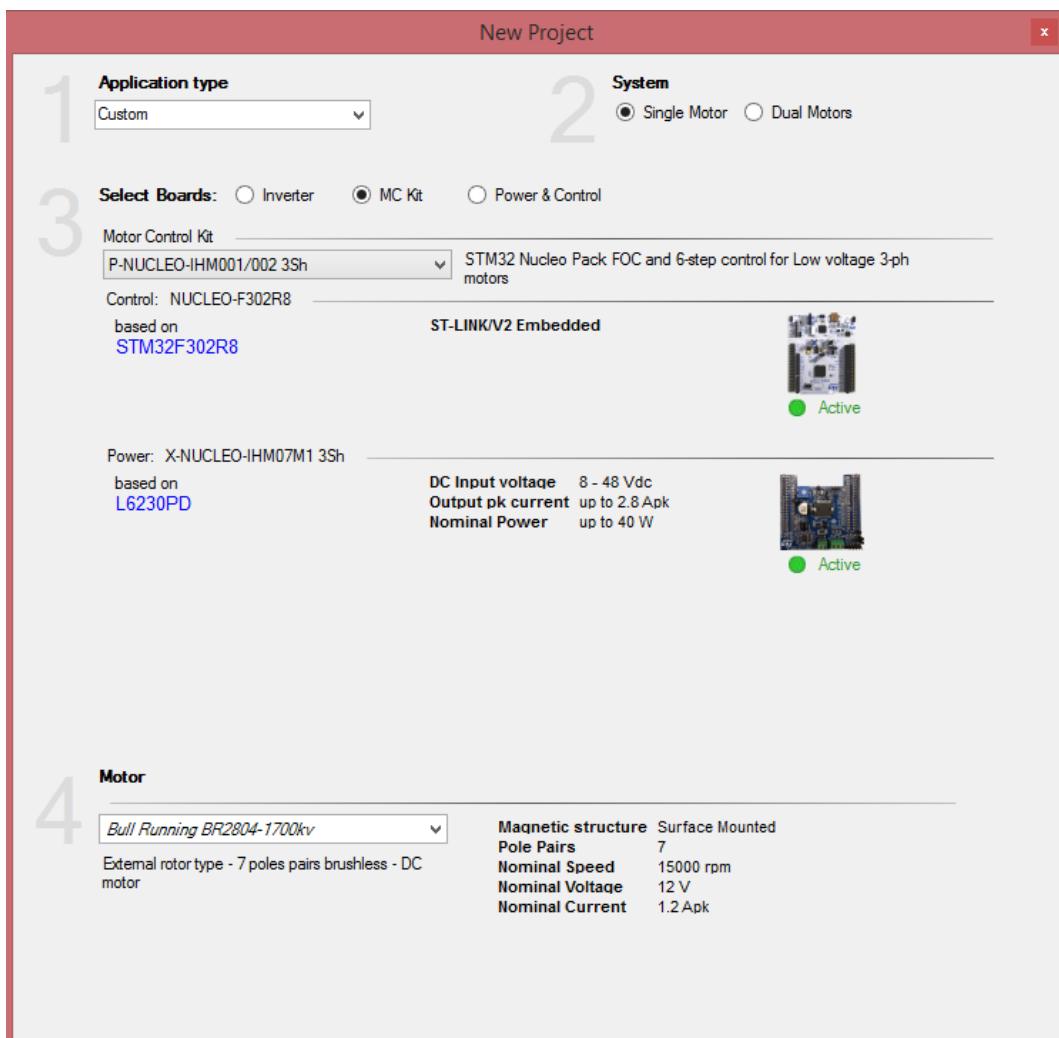


Figura 40: Parámetros de entrada del programa a indicar por el usuario. Fuente: ST MC Workbench, Autor.

Una vez hemos cargado el programa, nos aparece una interfaz como la de la siguiente figura:

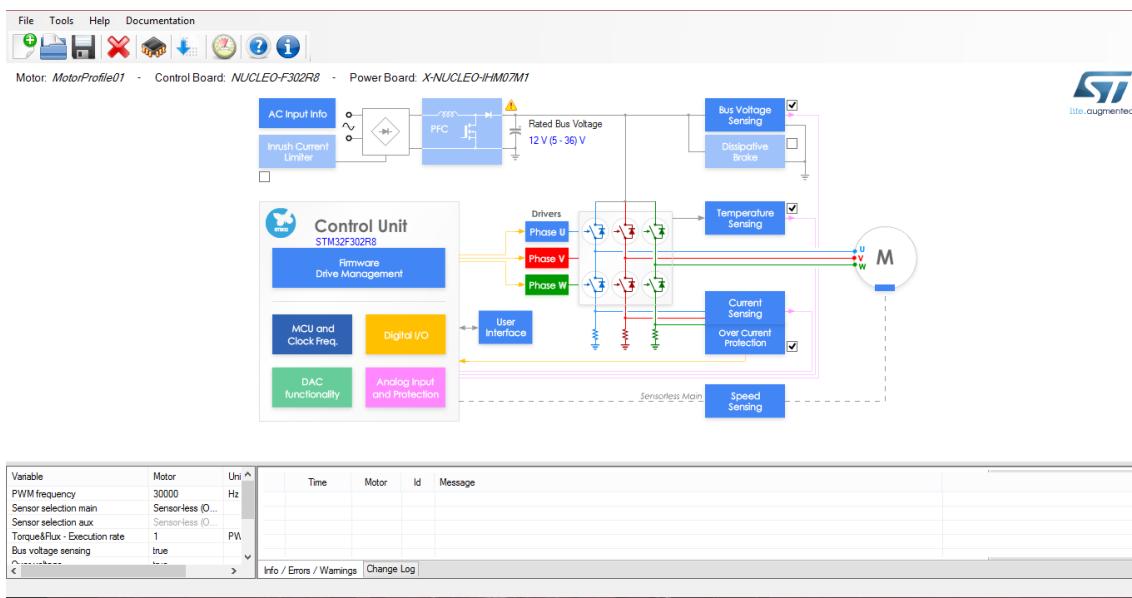


Figura 41: Interfaz principal del programa MC Workbench. Fuente: ST MC Workbench, Autor.

En esta ventana podemos configurar diferentes parámetros pinchando en cada uno de los bloques que nos aparecen, aunque muchos de estos parámetros vendrán introducidos de manera predeterminada.

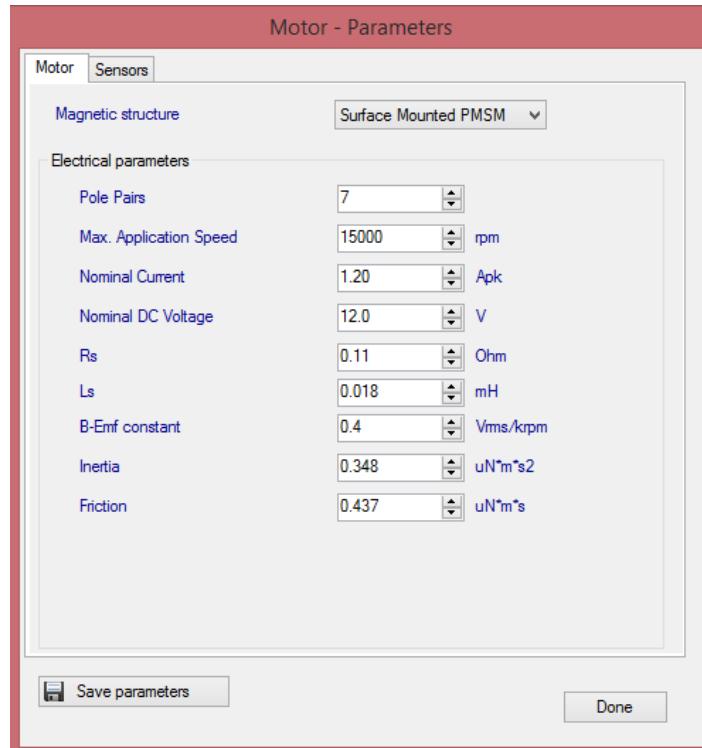


Figura 42: Parámetros del motor. Fuente: ST MC Workbench, Autor.

En la Figura 42 vemos los parámetros del motor que vamos a usar. Si nos fijamos, vemos que estos son los que nos ha proporcionado el programa, aunque podemos modificarlos según

nuestras necesidades o bien porque se haya podido producir algún cambio significativo en la disposición del sistema, como algún cambio en la carga del motor o incluso un cambio del propio motor.

Podemos introducir la tensión de alimentación de la red, que vendrá determinada por su valor eficaz, 230 V y por la frecuencia, 50Hz aquí en Europa. También disponemos de la opción de seleccionar la tipología de la medida de corriente, en este caso con tres shunts o la detección de sobrecorrientes para la protección del sistema.

Una vez que hemos terminado de introducir y/o modificar los parámetros que necesitamos, debemos exportar el proyecto para poder trabajar en el programa STM32CubeMX (37).

4.2.3. STM32CubeMX.

Para poder trabajar en el programa, debemos seleccionar el IDE (Integrated Development Environment) que en nuestro caso va a ser IAR EWARM V8 donde si fuera oportuno, podríamos modificar el código para cubrir nuestras necesidades.

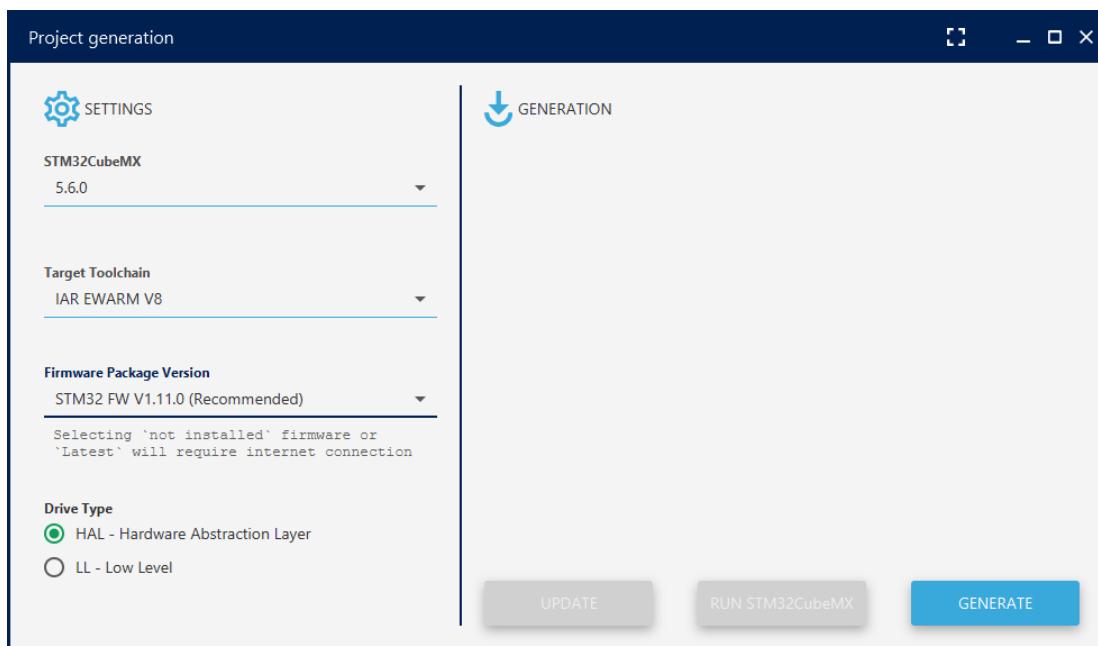


Figura 43: Exportar el proyecto para poder trabajar en STM32CubeMX. Fuente: STM32CubeMX, Autor.

El programa STM32CubeMX nos va a permitir comprobar y/o cambiar el uso de la CPU y de los diferentes elementos internos del microcontrolador para posteriormente generar el código de soporte a la aplicación que se desea desarrollar.

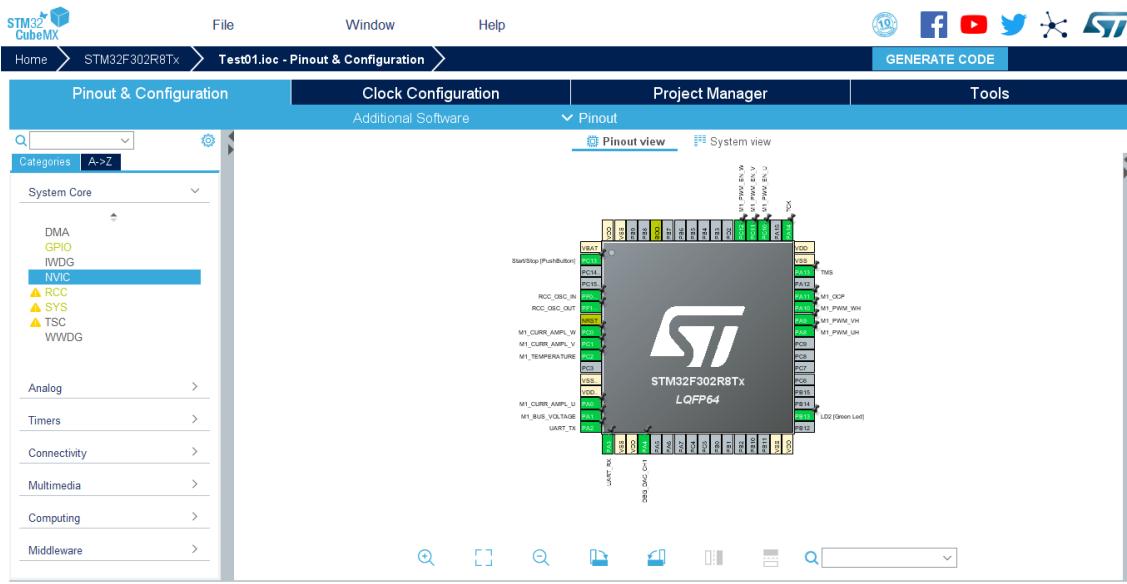


Figura 44: Interfaz del programa STM32CubeMX. Fuente: STM32CubeMX, Autor.

En la Figura 44 vemos la interfaz principal del programa que estamos exponiendo. En ella, como podemos observar en la Figura 45, nos aparecen las entradas y salidas que están en uso en nuestro proyecto.

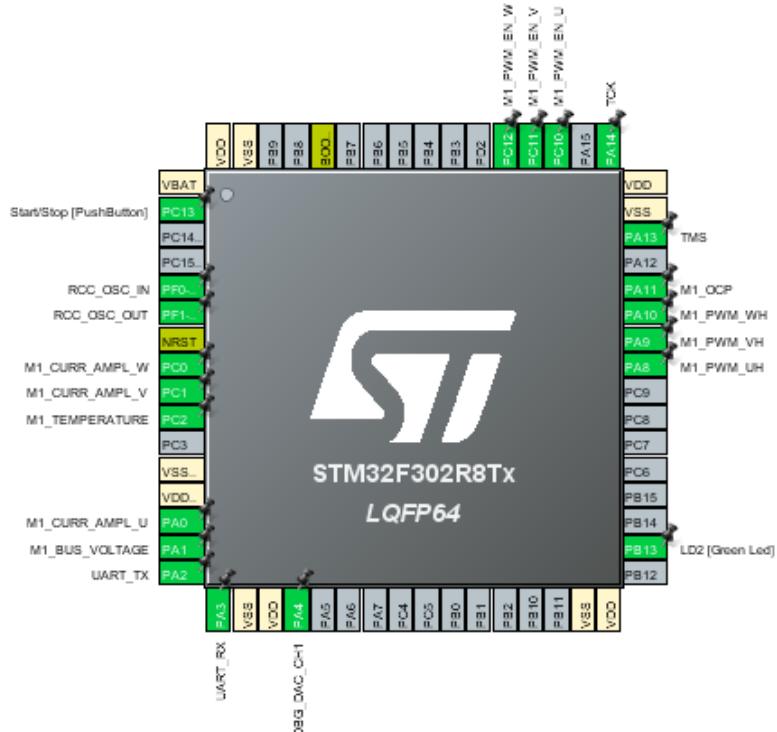


Figura 45: Pines en uso en nuestro microcontrolador. Fuente: STM32CubeMX, Autor.

Si nos fijamos de nuevo en la interfaz principal, por un lado, tenemos diferentes pestañas en la parte superior. En ella podemos comprobar la configuración del reloj y establecer los parámetros necesarios para generar el código al IDE que vayamos a usar, en nuestro caso el IAR Embedded Workbench V8. Por último, de acuerdo con los manuales y videotutoriales de ST (38), debemos realizar unas comprobaciones antes de generar el código.

En la parte derecha de la interfaz, encontramos una lista donde podemos ver un elemento cuyo nombre es “NVIC”, se trata del controlador de interrupciones del microcontrolador. Debemos abrir dicho elemento donde encontraremos las listas de la Figura 46 y la Figura 47, en ellas debemos comprobar que el elemento “EXTI line” (interrupciones externas) esté activado antes de proceder a la generación del código en C.

NVIC Mode and Configuration		
Configuration		
NVIC	Code generation	
Non maskable interrupt	<input checked="" type="checkbox"/>	0
Hard fault interrupt	<input checked="" type="checkbox"/>	0
Memory management fault	<input checked="" type="checkbox"/>	0
Pre-fetch fault, memory access fault	<input checked="" type="checkbox"/>	0
Undefined instruction or illegal state	<input checked="" type="checkbox"/>	0
System service call via SWI instruction	<input checked="" type="checkbox"/>	0
Debug monitor	<input checked="" type="checkbox"/>	0
Pendable request for system service	<input checked="" type="checkbox"/>	0
Time base: System tick timer	<input checked="" type="checkbox"/>	4
PVD interrupt through EXTI line16	<input type="checkbox"/>	0
Flash global interrupt	<input type="checkbox"/>	0
RCC global interrupt	<input type="checkbox"/>	0
ADC1 interrupt	<input checked="" type="checkbox"/>	2
TIM1 break and TIM15 interrupts	<input checked="" type="checkbox"/>	4
TIM1 update and TIM16 interrupts	<input checked="" type="checkbox"/>	0
TIM1 trigger, commutation and TIM17 interrupts	<input type="checkbox"/>	0
TIM1 capture compare interrupt	<input type="checkbox"/>	0
USART2 global interrupt	<input checked="" type="checkbox"/>	3
EXTI line[15:10] interrupts	<input checked="" type="checkbox"/>	3
TIM6 global interrupt, DAC interrupts	<input type="checkbox"/>	0
Floating point unit interrupt	<input type="checkbox"/>	0

Figura 46: NVIC. Fuente: STM32CubeMX, Autor.

Configuration			
Enabled interrupt table	<input checked="" type="checkbox"/> Select for init sequ...	<input type="checkbox"/> Generate IR...	<input type="checkbox"/> Call HAL ...
Pendable request for sy...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Time base: System tick...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
ADC1 interrupt	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
TIM1 break and TIM15 i...	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
TIM1 update and TIM16 ...	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
USART2 global interrupt	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
EXTI line[15:10] interrupts	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Interrupt unmasking ordering table (interrupt init code is moved after all the periph...)

Figura 47: Opciones en la generación de código. Fuente: STM32CubeMX, Autor.

Una vez que hemos comprobado y/o modificado los usos que nuestra aplicación va a realizar de la CPU debemos generar el código fuente del programa que va a llevar a cabo el control vectorial y abrirlo con el programa de desarrollo IAR Embedded Workbench.

4.2.4. IAR EMBEDDED WORKBENCH.

El IDE (Integrated Development Environment) de IAR (39) nos permite hacer modificaciones en el código final del control, como por ejemplo el estado de los leds en función de si el motor está en marcha o paro.

No obstante, cabe puntualizar que, debido a la complejidad del programa de control, no es recomendable realizar modificaciones en este punto a no ser que el usuario sepa realmente lo que está haciendo, pues podríamos incurrir en severos problemas modificando el código generado por el programa previo, el STM32CubeMX.

Por último, debemos descargar la aplicación en la placa y podemos empezar a usar el motor BR2804.

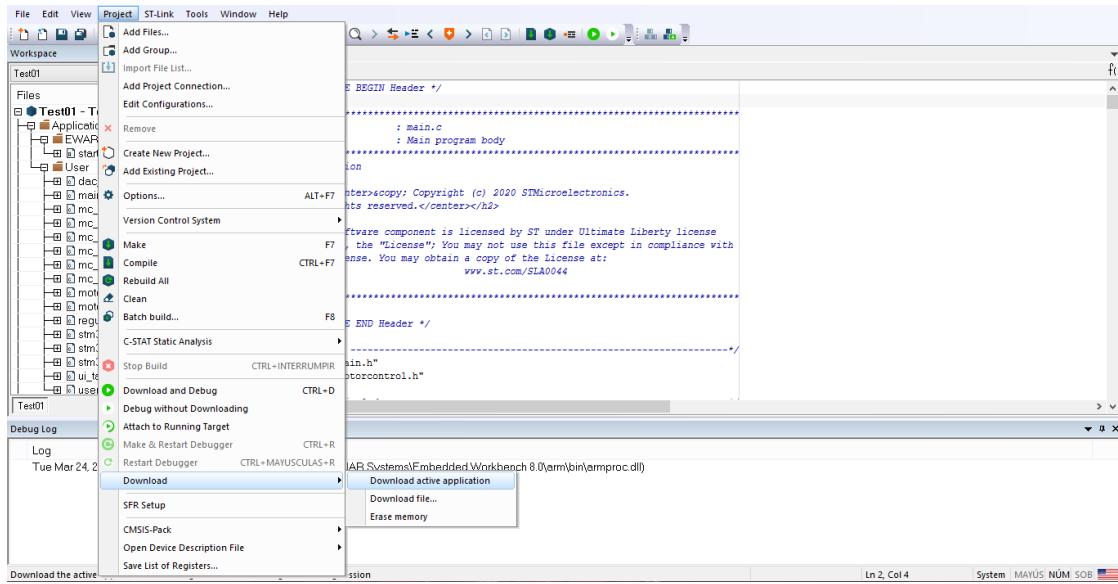


Figura 48: Descarga de la aplicación en la placa. Fuente: IAR Embedded Workbench, Autor.

4.3. EXPOSICIÓN DE PRUEBAS Y RESULTADOS.

Ahora que ya hemos visto los programas que han de ser usados para la implementación del control FOC en el Kit de ST, vamos a proceder con la exposición de los ensayos y pruebas realizadas para la obtención de los resultados que a continuación se detallan.

En el apartado anterior hemos usado el programa “ST Motor Control Workbench”, dicho programa es el que nos ha permitido hacer las pruebas gracias a su sencilla consola de control y a las diferentes pestañas de las que consta su interfaz donde encontramos diferentes campos de parámetros a modificar. De esta manera podemos observar la variación en el comportamiento del motor ante el cambio en sus valores de control gracias al plotter del que consta el citado programa.

4.3.1. HERRAMIENTAS DE PRUEBAS.

Si nos fijamos en Figura 41 vemos que, en la parte superior en la barra de herramientas encontramos el símbolo de un velocímetro, es desde ahí donde podemos abrir la interfaz de control del motor.

De esta manera vamos a poder realizar una serie de pruebas para testear el control de velocidad mediante el control de velocidad y así ver de manera más detallada lo expuesto en la teoría.



Figura 49: Interfaz básica de control del motor. Fuente: ST MC Workbench, Autor.

Dicha interfaz la podemos observar en la Figura 49, donde vemos su sencillez y a la vez la cantidad de información que podemos obtener de ella. En la parte central de la pantalla tenemos diferentes displays que, de izquierda a derecha y de arriba abajo nos muestran la tensión del bus de DC, la potencia que está consumiendo el motor, la temperatura¹¹ del motor, la velocidad de este y, por último, un *dimmer* con el que poder variar manualmente la velocidad del motor. En la parte derecha de la pantalla podemos observar una serie de comandos que nos sirven para controlar el motor mediante los botones Start/Stop. También podemos detener la rampa de aceleración del motor y un último botón que nos sirve para reconocer que hemos visto que el motor se encuentra en falta. Las posibles faltas que podemos ver las encontramos en una columna en la parte izquierda de la pantalla. Y, por último, una herramienta que va a ser de gran importancia es el plotter que encontramos en la barra de herramientas en la parte superior de la pantalla.

La siguiente pestaña que nos encontramos es la del control avanzado del motor. Esta la podemos observar en la Figura 50, donde encontramos diferentes campos a modificar que tendrán un efecto en el comportamiento del motor.

Principalmente, en esta pantalla vamos a introducir diferentes valores del control PID de manera empírica y observaremos en el plotter el diferente comportamiento de la gráfica de velocidad del motor para ver con qué valores de PI¹² alcanza el valor de manera más precisa.

¹¹ Para que la temperatura sea medida el hardware debe contar con un termopar para ello. En nuestro caso, debido a que no disponemos de este la temperatura mostrada es un valor predeterminado que en ningún caso mostrará el valor real de dicho parámetro.

¹² Recordemos que en el control vectorial no se suele implementar el control D debido a la rapidez con la que cambia el sistema, ya que esto podría causar una respuesta excesiva por parte de este control.

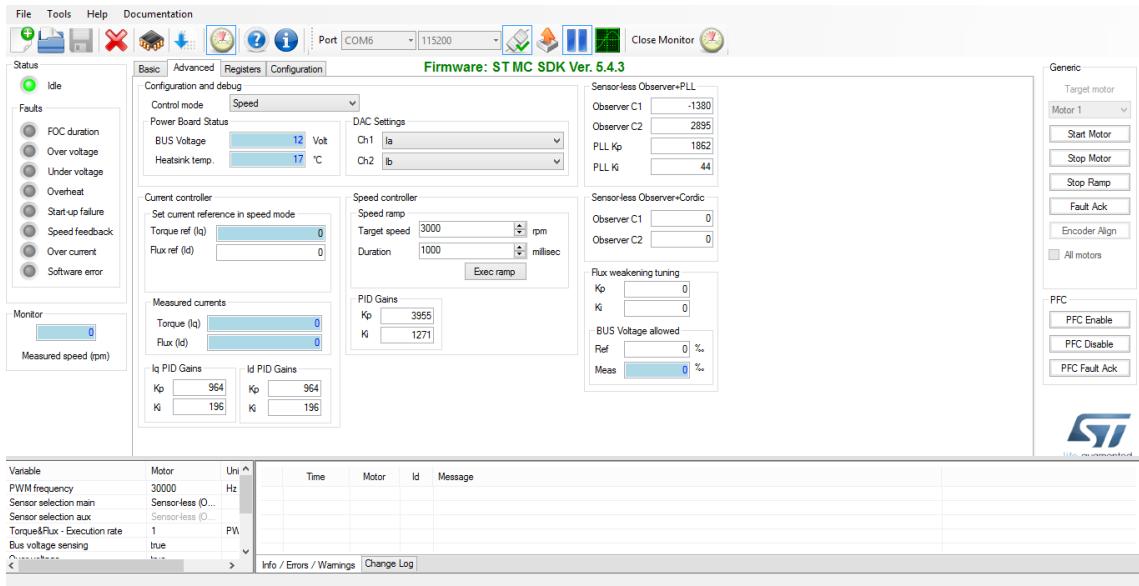


Figura 50: Interfaz avanzada de control del motor. Fuente: ST MC Workbench, Autor.

Podemos modificar los valores de la pendiente de velocidad, su velocidad máxima y el tiempo que se tarda en alcanzarla. También en esta pestaña podemos modificar distintos valores de los observadores y de la técnica de debilitamiento de campo (Figura 51).

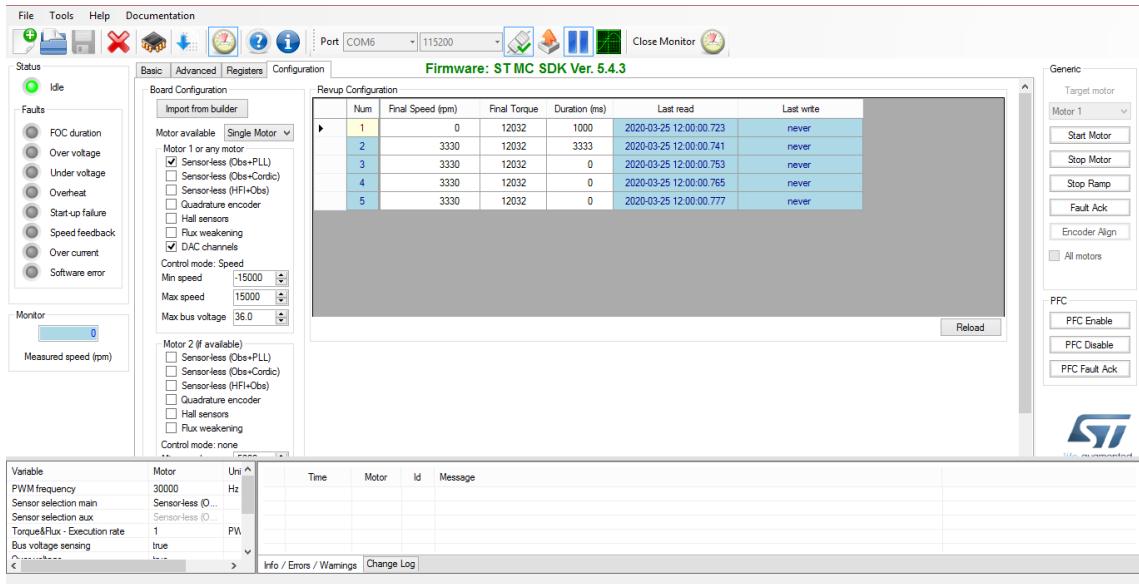


Figura 51: Pestaña de configuración. Fuente: ST MC Workbench, Autor.

En la última pestaña que encontramos tenemos la posibilidad de configurar varias rampas de velocidad. En los campos que observamos en la Figura 51 podemos introducir diferentes valores de velocidad y tiempo y ver como el motor responde ante las diferentes velocidades de referencia.

4.3.2. PRUEBAS EMPÍRICAS DEL CONTROL PI.

En este apartado se presentan los diferentes resultados y/o gráficas que muestran el comportamiento del motor ante la realización de diferentes pruebas con distintos valores. De esta manera se pretende comprender de un modo más práctico el control orientado de campo y como influye el control PI en él.

Como apuntábamos antes, vamos a ir cambiando los valores del control para observar como el motor se comporta de diferente manera ante dichas variaciones.

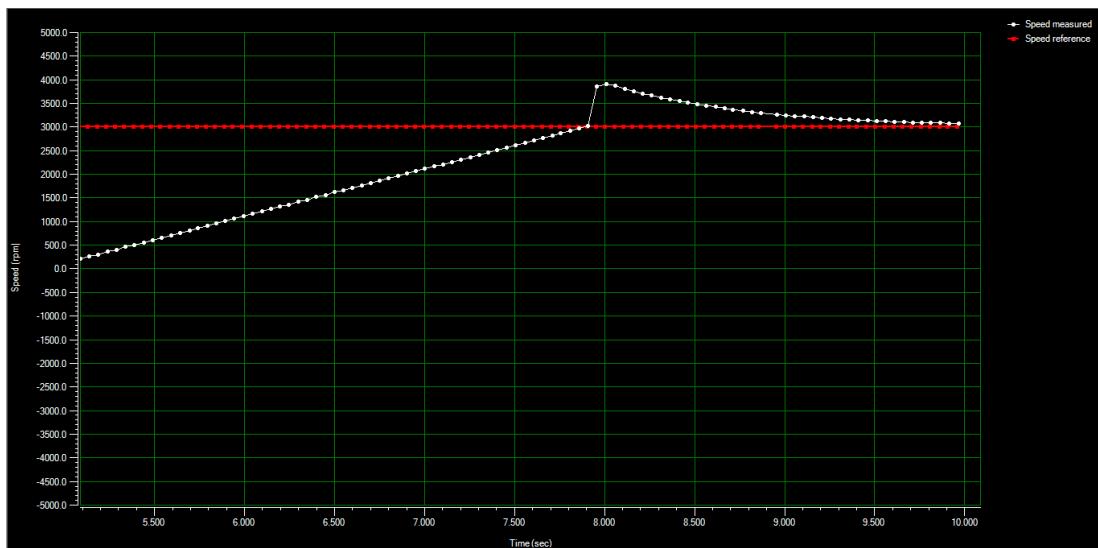


Figura 52: Sobreoscilación en la velocidad del motor. Fuente: ST MC Workbench, Autor.

En la Figura 52 vemos como el motor acelera ganando velocidad para alcanzar la velocidad de referencia (marcada con una línea roja) y se produce una sobreoscilación, que luego se reduce hasta situarse prácticamente a la velocidad de referencia. Los valores de las ganancias que producen dicha curva se presentan en la siguiente tabla:

GANANCIAS PI	
K_p	3955
K_i	1271

Tabla 13: Valores iniciales de las ganancias del control PI. Fuente: ST MC Workbench, Autor.

Para proceder a introducir de manera empírica los valores y poder ir entendiendo cómo influyen estos en la gráfica de velocidad, en primer lugar, vamos a darle un valor a K_i (ganancia de la parte integral) de cero y un valor reducido a K_p (ganancia de la parte proporcional), de manera que iremos aumentando este último hasta conseguir un resultado deseado y a continuación procederemos a dar valores a K_i hasta que el resultado sea el más preciso posible.

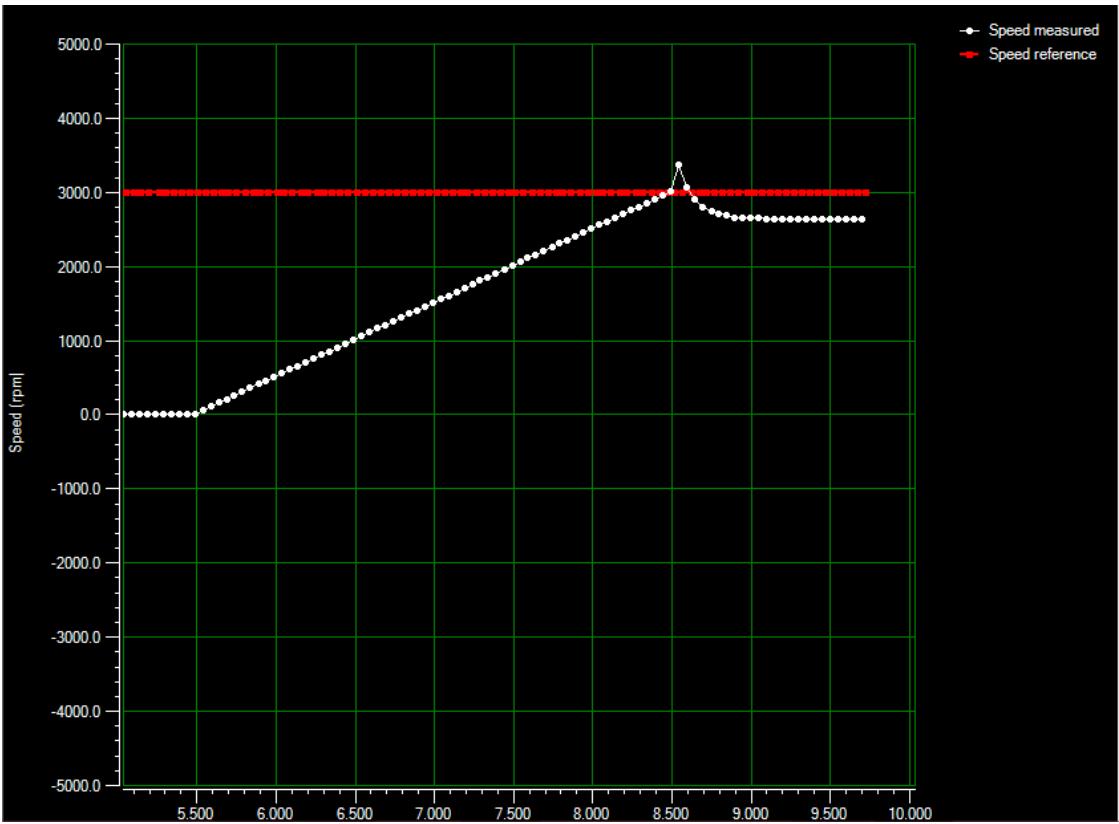


Figura 53: Gráfica de velocidad con $K_p = 1000$ y $K_i = 0$. Fuente: ST MC Workbench, Autor.

GANANCIAS PI	
K_p	1000
K_i	0

Tabla 14: Valores de la primera prueba del control PI. Fuente: ST MC Workbench, Autor.

Los resultados con los valores de la Tabla 14 los podemos ver en la Figura 53. Se observa que, de acuerdo con lo explicado en el apartado 3.1.3, con tan solo el control “P” el error se intenta reducir proporcionalmente pero siempre queda un pequeño error u “offset” que por sí sólo el control “P” no es capaz de solventar. Dicho error permanece constante en estado estable y no desaparece.

Probando diferentes valores para $K_p= 2000, 3000, 3500, 3800$ encontramos que este último valor genera una respuesta más adecuada por no generar un pico de velocidad demasiado alto y por tener un error en estado estable más reducido.

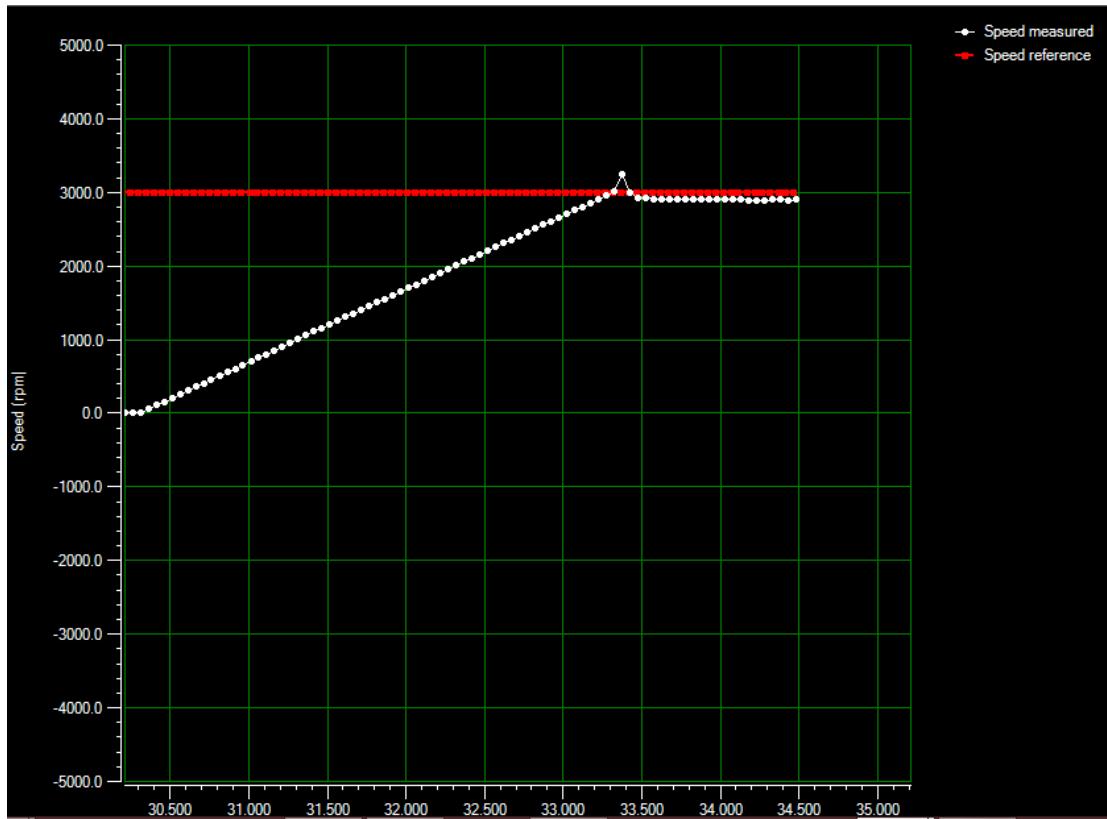


Figura 54: Gráfica de velocidad con $K_p = 3800$ y $K_i = 0$. Fuente: ST MC Workbench, Autor.

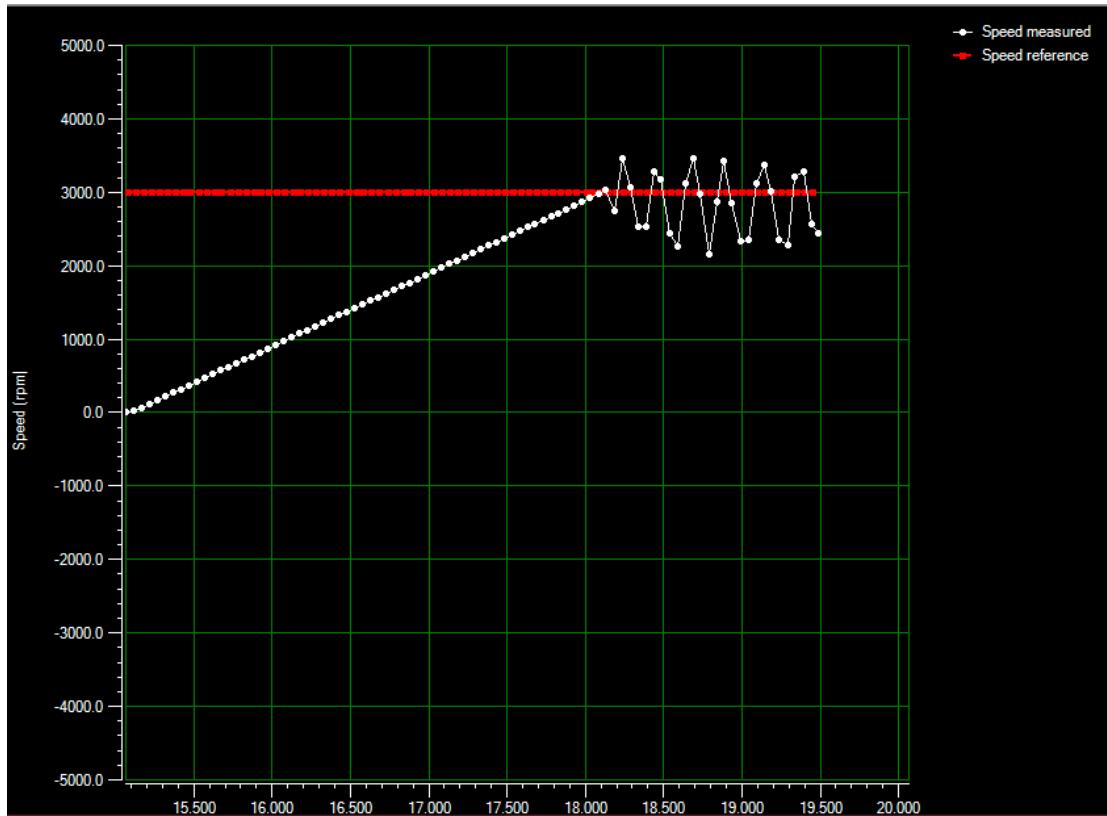


Figura 55: Sobreoscilación producida por un valor muy elevado de K_p . Fuente: ST MC Workbench, Autor.

En la Figura 55 vemos el resultado de dar un valor muy elevado a K_p sin añadir el término K_i , lo que se produce es una sobre oscilación que se prolonga en el tiempo. Debido al error que se produce, el sistema intenta aplicar una solución, pero lo que consigue es seguir generando un error grande, de ese modo continúa intentando aplicar una solución y al no conseguir reducir el error, este se extiende indefinidamente.

A continuación, debemos proceder dando valores a K_i para poder solventar el error en estado estable que se aprecia en la Figura 54. Se presentan a continuación diferentes gráficas con los valores introducidos para realizar las pruebas:

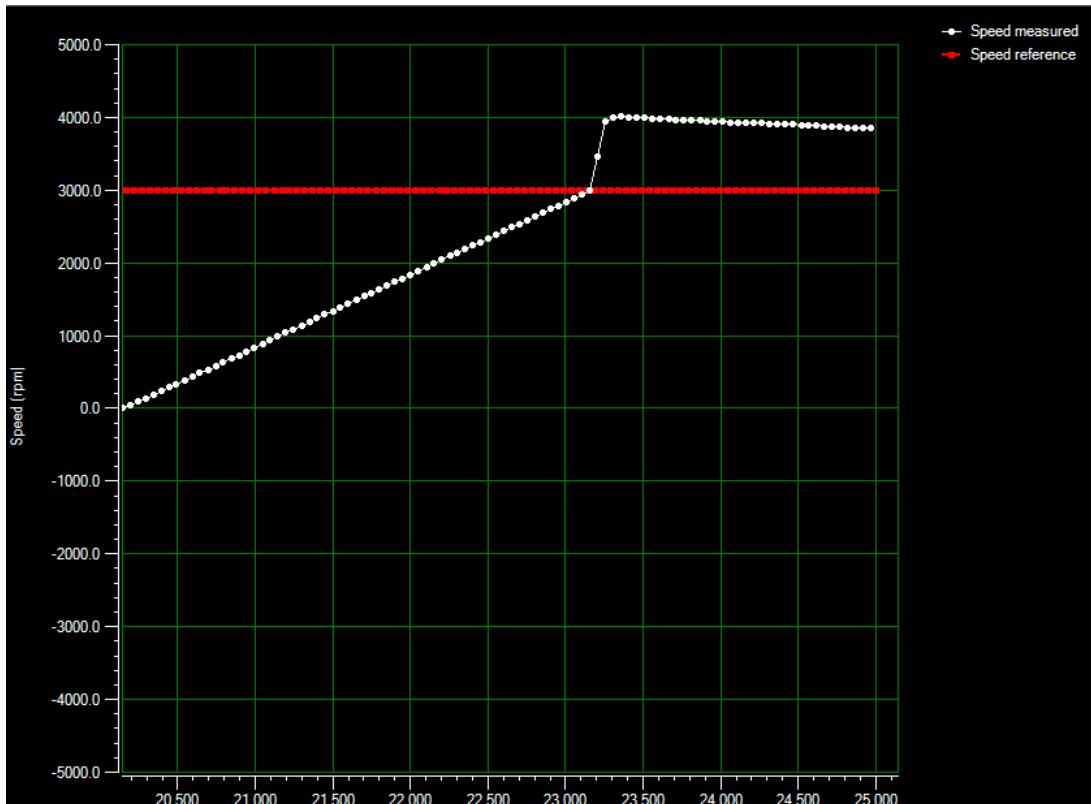


Figura 56: Gráfica de velocidad con $K_p = 3800$ y $K_i = 100$. Fuente: ST MC Workbench, Autor.

GANANCIAS PI	
K_p	3800
K_i	100

Tabla 15: Valores de prueba del control PI. Fuente: ST MC Workbench, Autor.

En este caso, vemos como el error se va reduciendo de manera progresiva, aunque lentamente y terminaría haciéndose cero. Sin embargo, si lo que queremos es una respuesta más rápida lo que debemos hacer es aumentar el valor de K_i . Podemos introducir un valor de, en este caso 500 y ver el resultado, o incluso de 1000, y dicha respuesta es la que se observa en la Figura 57. En ella se aprecia una respuesta más rápida a la petición de velocidad.

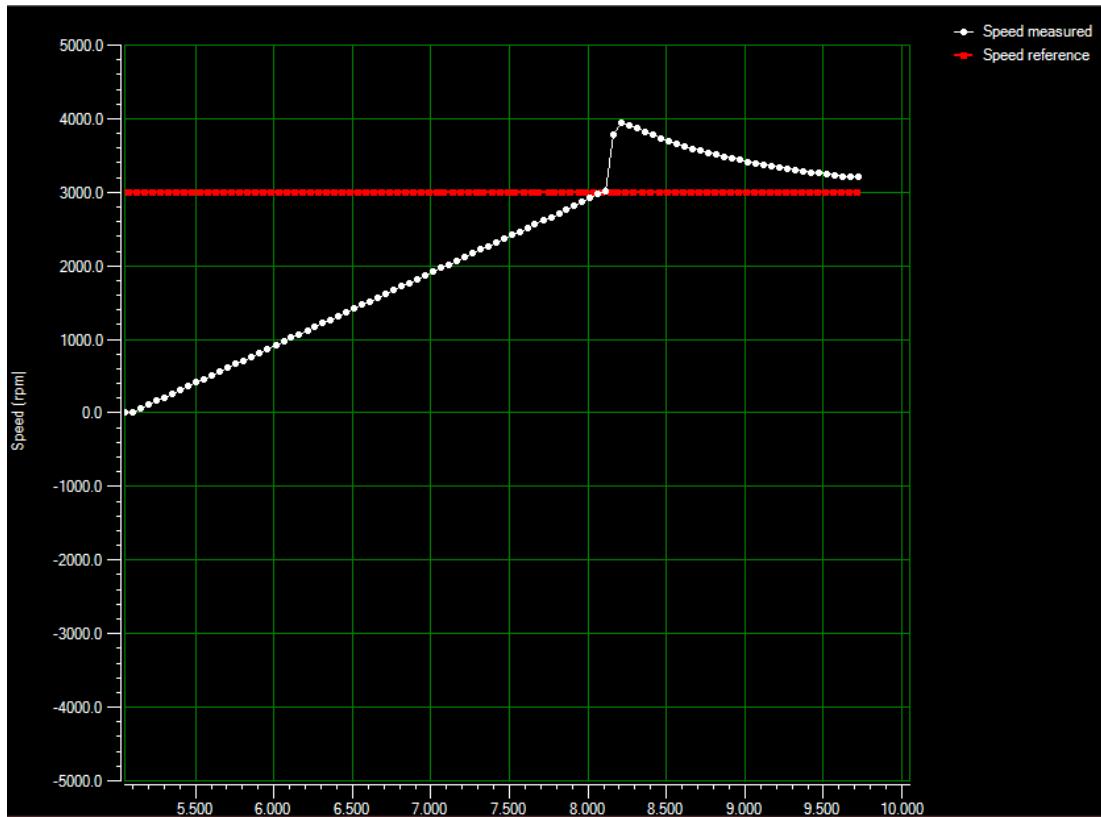


Figura 57: Gráfica de velocidad con $K_p = 3800$ y $K_i = 1000$. Fuente: ST MC Workbench, Autor.

GANANCIAS PI	
K_p	3800
K_i	1000

Tabla 16: Valores de prueba del control PI. Fuente: ST MC Workbench, Autor.

En vista de los resultados queda claro que, si queremos obtener de manera empírica los valores de las ganancias del controlador PI, debemos probar diferentes valores hasta encontrar una respuesta deseada. Otra opción, sería estudiar el sistema y su aplicación en cuestión para obtener los valores de dicho controlador de manera más precisa.

La última gráfica de estas pruebas que se presenta (Figura 58), mediante la prueba y error, se ha obtenido una curva más precisa con unos valores de K_p y K_i de 7100 y 8000 respectivamente.

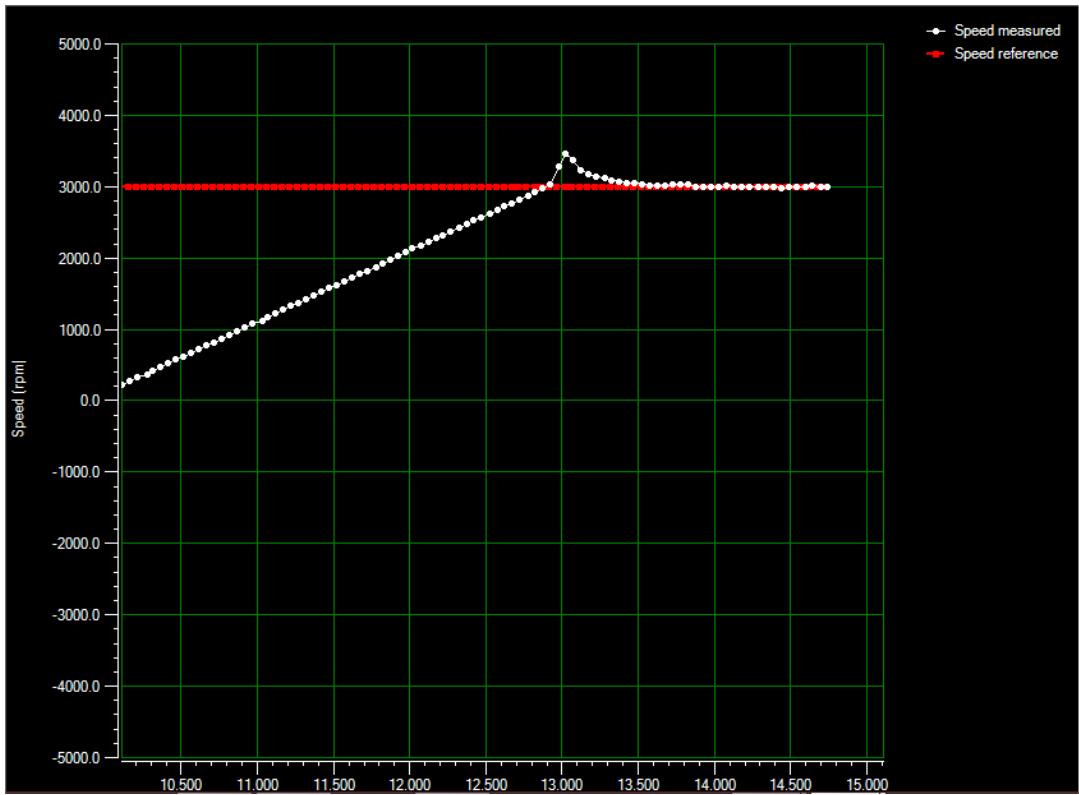


Figura 58: Gráfica de velocidad con $K_p = 7100$ y $K_i = 8000$. Fuente: ST MC Workbench, Autor.

GANANCIAS PI	
K_p	7100
K_i	8000

Tabla 17: Tabla 16: Valores de la última prueba del control PI. Fuente: ST MC Workbench, Autor.

4.3.3. RAMPAS DE VELOCIDAD.

El kit de control del que disponemos en este proyecto también nos permite programar rampas de aceleración y deceleración que podemos observar de nuevo mediante el uso del plotter.

De modo que en el apartado que nos trae a continuación vamos a presentar un total de cuatro rampas a modo de ejemplo y así poder observar como el motor, gracias al control vectorial sigue dichas rampas de un modo preciso.

En primer lugar, se presenta una tabla en la que se incluye las características de velocidad inicial y final, así como el tiempo de duración de cada rampa y el tipo de rampa (aceleración o deceleración).

RAMPA	VELOCIDAD INICIAL	VELOCIDAD FINAL	TIEMPO	TIPO
1	3000 r.p.m.	7000 r.p.m.	1000 s	Aceleración
2	7000 r.p.m.	3000 r.p.m.	3000 s	Deceleración
3	3000 r.p.m.	8000 r.p.m.	3000 s	Aceleración
4	8000 r.p.m.	5000 r.p.m.	2000 s	Deceleración

Tabla 18: Valores característicos de las rampas. Fuente: Autor.

Ahora nos queda presentar las gráficas que muestran los datos presentados en las tablas sobre estas líneas.

Podemos ver la velocidad inicial y final representadas en el eje vertical de las gráficas y el tiempo de rampa en el eje horizontal de estas.

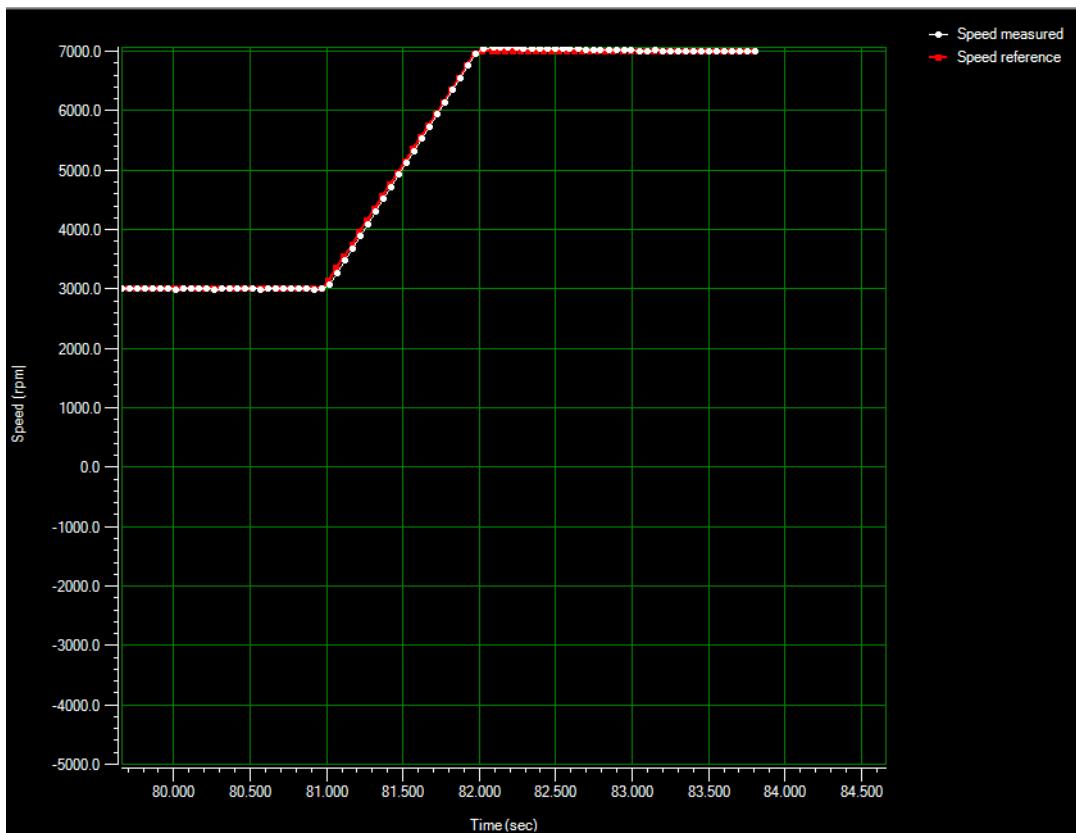


Figura 59: Rampa de aceleración 1. Fuente: ST MC Workbench, Autor.

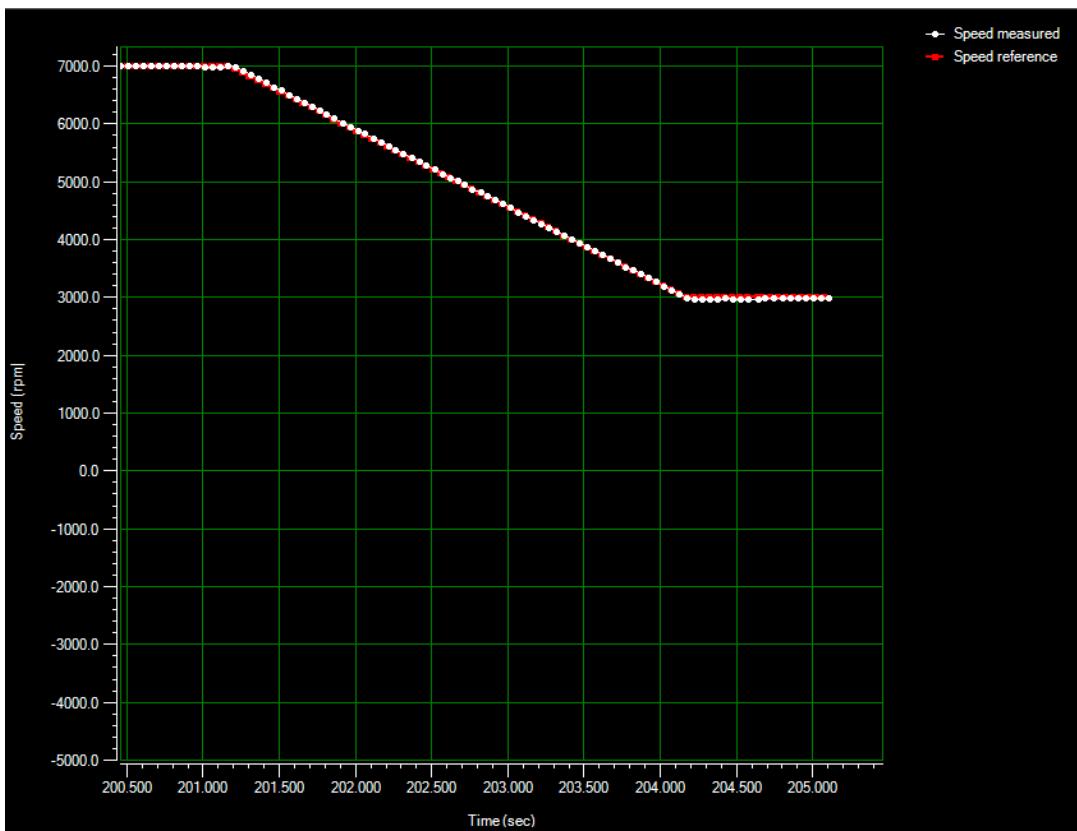


Figura 60: Rampa de deceleración 2. Fuente: ST MC Workbench, Autor.

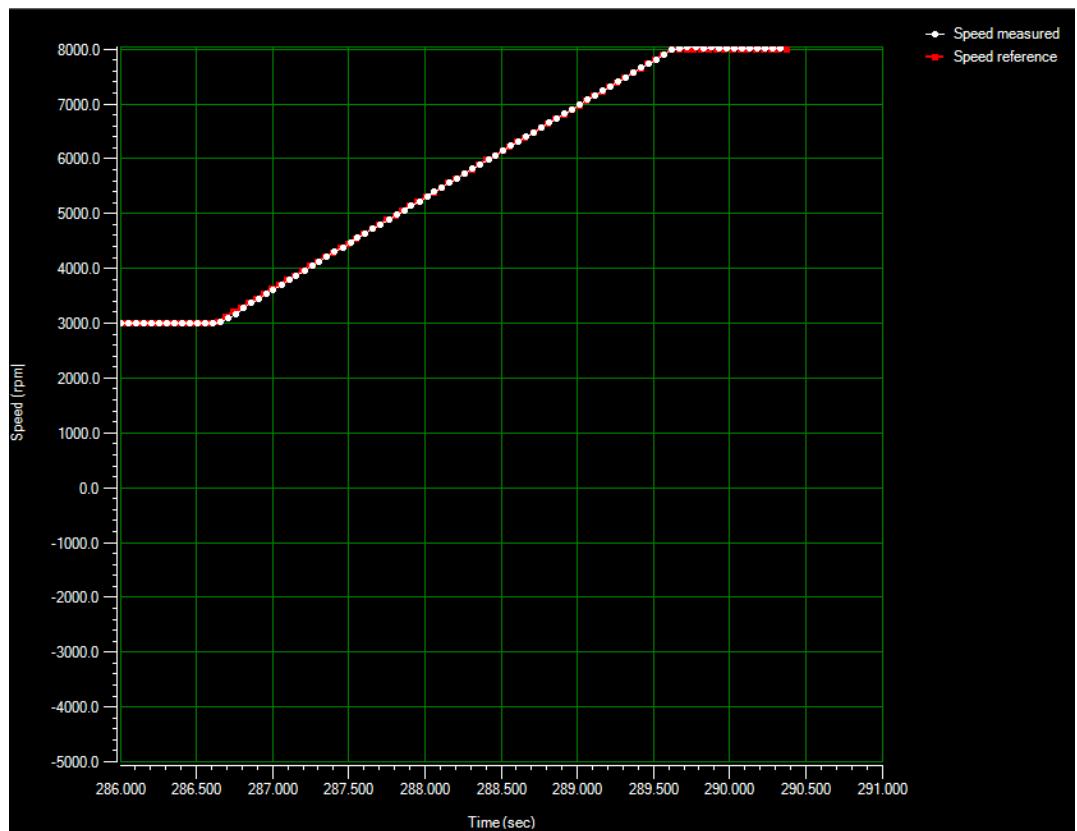


Figura 61: Rampa de aceleración 3. Fuente: ST MC Workbench, Autor.

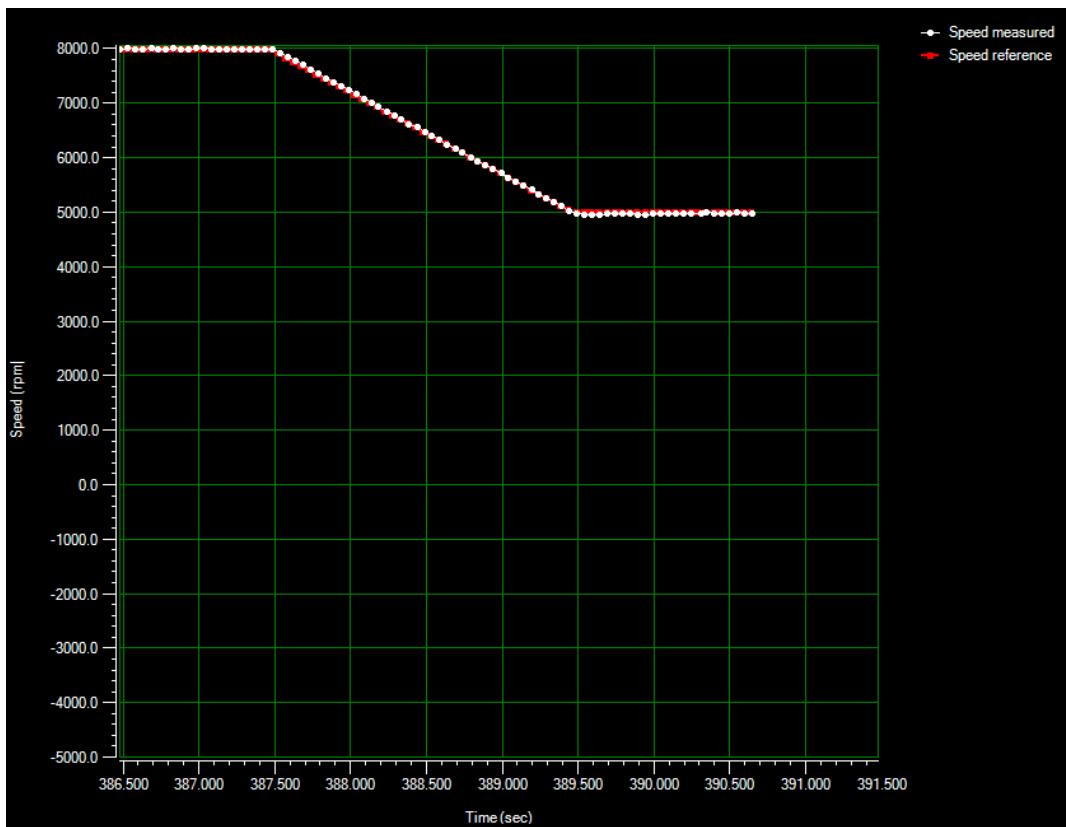


Figura 62: Rampa de deceleración 4. Fuente: ST MC Workbench, Autor.

5. CONCLUSIONES.

Como último punto de la presente memoria nos trae este apartado las conclusiones sobre la misma y sobre los resultados obtenidos y pruebas realizadas.

El proyecto que estamos leyendo pretende ser un documento que sirva para presentar de manera simple y amena los diferentes conceptos que ya hemos visto.

Comenzando por los motores BLDC, siendo estos de gran aplicación hoy en día en muchos aspectos, será de interés conocerlos tanto por alumnos y docentes de ingeniería eléctrica o asignaturas relacionadas como por aquellas personas que, por ejemplo, estén interesadas en el mundo de los drones.

El siguiente concepto que nos trae aquí es el del control vectorial o control orientado de campo (FOC). Hemos presentado de manera simple los principales conceptos del control y su manera de proceder. Recalcando, simple, pues este tema llega a ser de gran complejidad entenderlo en su totalidad y no es objeto de este documento su análisis en profundidad.

Y en último lugar, tenemos el trabajo y las pruebas realizadas gracias al kit de control de ST. Dicho kit nos ha proporcionado las herramientas básicas para entrar en contacto con el control FOC y, de esa manera, facilitar su comprensión. No obstante, cabe decir que en el presente documento nos hemos centrado en el control de velocidad mediante el control orientado de campo a pesar de también haber podido hacer control del par. Esto se ha decidido hacer así pues de otro modo se habría convertido en un proyecto demasiado extenso. Como decía, nos

hemos centrado en el control de velocidad y en particular en la influencia del control PI en el comportamiento del motor además de en la precisión de este para realizar rampas de aceleración y deceleración.

Por la manera en la que se ha procedido para la realización de las pruebas y de la visualización que se ha realizado del comportamiento del motor debemos decir que el presente proyecto sería una manera acertada de presentar el control FOC a los estudiantes de ingeniería. Debido a su aspecto interactivo y su bajo coste permitirían a todos los estudiantes interactuar con el kit y con dicho control de manera más independiente, comprendiendo su funcionamiento y, por supuesto, su teoría básica.

No sería justo terminar sin decir que el kit que hemos usado junto con las herramientas e información que ST proporciona ofrecen gran cantidad de posibilidades y aplicaciones donde poder realizar la implementación del control vectorial.



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

II. PRESUPUESTO

TRABAJO FINAL DEL

Grado en Ingeniería Eléctrica

REALIZADO POR

SERGIO CIFRE GREGORIO

TUTORIZADO POR

FRANCISCO RODRÍGUEZ BALLESTER

CURSO ACADÉMICO: 2019/2020

6. DESCRIPCIÓN DEL PRESUPUESTO.

En esta sección del proyecto vamos a desarrollar el presupuesto de manera detallada para poder evaluar sus costes. Además, nos permitirá saber que costaría realizar la implementación de dicho proyecto de igual manera, por ejemplo, en clases universitarias debido a lo didáctico que es poder realizar el control orientado de campo por aquellos estudiantes que entran en contacto con él por primera vez.

Otro punto por el cual nos puede ser de gran ayuda sentar las bases de un presupuesto como con el que a continuación tratamos es que sirva de base para realizar un estudio de costes en la implementación del control FOC en diferentes proyectos, como pueden ser el diseño y construcción de drones o la automoción.

Para el cálculo de la mano de obra del ingeniero que ha trabajado en el desarrollo e implementación del proyecto, así como en la redacción del presente documento que expone el trabajo llevado a cabo se ha establecido un precio acorde a lo establecido en el convenio del metal para 2019, del cual se han tomado los valores para calcular el precio/hora. En dicho convenio se establece un sueldo base para técnicos de 1647,32 € que multiplicado por doce mensualidades más tres pagas extra y dividido entre mil setecientas cincuenta y dos horas anuales (indicadas en el convenio) da un total de 14,1 €/hora. Dicho precio/hora se ha establecido como el valor de referencia con el que se va a calcular el presupuesto. Por otro lado, sabemos que el Trabajo Final de Grado consta de 12 ECTS y cada ECTS equivale a 25 horas de trabajo, por lo que la dedicación total que debemos atribuir al presente proyecto es de 300 horas en total. De esta manera podemos realizar el cálculo del coste total del trabajo del ingeniero que ha trabajado en la realización del TFG de Ingeniería Eléctrica.

Para el precio del kit, hemos tomado el precio de venta que la propia empresa STMicroelectronics nos ofrece en su página web. Dicho precio asciende a un total de 49,90 \$, cuya conversión a fecha de hoy asciende a 44,65 €.

Debemos puntualizar que el coste del uso de programas informáticos está supeditado al coste de las licencias de dichos programas. En nuestro caso, el coste de las licencias de los programas ha sido de cero euros, debido a que o bien hemos usado programas de la empresa STMicroelectronics que no tenían ninguna licencia de pago, o bien se ha usado la licencia de la UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA. No obstante, si se deseara implementar el proyecto en otras aplicaciones, es posible que se debiera tener en cuenta el precio de dichas licencias.

7. COSTE DE LOS MATERIALES.

A continuación, se detalla en forma de tabla el presupuesto de los materiales usados en el desarrollo del proyecto.

COSTE DE LOS MATERIALES DEL PROYECTO			
TIPO	CANTIDAD	PRECIO	TOTAL
P-NUCLEO-IHM002 (KIT DE CONTROL + FUENTE ALIMENTACIÓN)	1	44,65 €	44,65 €
TOTAL MATERIALES DEL PROYECTO			44,65 €

Tabla 19: Tabla con los costes de los materiales. Fuente: Autor.

8. COSTE DE LA MANO DE OBRA.

Aquí observamos, como habíamos puntualizado en el primer apartado de la sección del presupuesto, el coste del ingeniero en el desarrollo e implementación del presente proyecto.

COSTE DE INGENIERÍA			
TIPO	CANTIDAD	PRECIO	TOTAL
INGENIERÍA	300 h	14,10 €/hora	4.230,00 €
COSTE TOTAL DE INGENIERÍA			4.230,00 €

Tabla 20: Tabla con los costes de ingeniería. Fuente: Autor.

9. COSTE FINAL DEL PROYECTO.

Por último, presentamos en este apartado, el coste final del proyecto. Se ha añadido un diez por ciento al coste total para cubrir gastos incurridos en la realización del proyecto y un seis por ciento que representa el beneficio industrial por la realización de este.

El veintiún por ciento de la suma del coste del proyecto más el beneficio industrial y los gastos incurridos representan el impuesto de valor añadido (I.V.A.) del proyecto.

COSTE FINAL DEL PROYECTO			
TIPO	CANTIDAD	PRECIO	TOTAL
COSTE DE LOS MATERIALES	1	44,65 €	44,65 €
COSTE DE INGENIERÍA	1	4.230,00 €	4.230,00 €
TOTAL DEL PROYECTO			4.274,65 €
BENEFICIO INDUSTRIAL	0,06	4.274,65 €	256,48 €
COSTES GENERALES INCURRIDOS 10%	0,1	4.274,65 €	427,47 €
IVA 21%	0,21	4.958,59 €	1.041,30 €
PRECIO FINAL DEL PROYECTO			5.999,90 €

Tabla 21: Tabla con los costes finales del proyecto. Fuente: Autor.

El precio final del proyecto asciende a un total de cinco mil novecientos noventa y nueve euros con noventa centimos (5.999,90 €). (40)



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

III. PLIEGO DE CONDICIONES

TRABAJO FINAL DEL

Grado en Ingeniería Eléctrica

REALIZADO POR

SERGIO CIFRE GREGORIO

TUTORIZADO POR

FRANCISCO RODRÍGUEZ BALLESTER

CURSO ACADÉMICO: 2019/2020

10. DEFINICIÓN Y ALCANCE DEL PLIEGO.

El proyecto que se describe en el presente documento trata sobre el desarrollo e implementación del control vectorial o control orientado de campo mediante la ayuda del kit P-NUCLEO-IHM002 (KIT DE CONTROL + FUENTE ALIMENTACIÓN) de la plataforma de STMicroelectronics.

El objetivo del presente proyecto es dar a conocer y explicar en primer lugar, las generalidades y características de los motores BLDC. En segundo lugar, sentar las bases del conocimiento básico que un ingeniero eléctrico debe conocer acerca del control vectorial. Y, en tercer lugar, realizar una serie de pruebas y ensayos básicos para conocer de manera didáctica dicho control.

El ámbito en el cual es de aplicación este documento es en la reproducción del estudio y los ensayos que en él se realizan. No obstante, cabe puntualizar que en caso de querer implementar dicho control en otras aplicaciones se deberá estudiar las condiciones particulares que en dichas situaciones se den.

11. CONDICIONES Y NORMAS DE CARÁCTER GENERAL.

En esta sección se presentan las normas y condiciones de carácter general que el proyecto en estudio debe cumplir de manera imperativa.

11.1. INSTALACIÓN.

Para la realización del control orientado de campo por medio del kit de control FOC se deberá comprobar si se cumplen los requisitos para la instalación del software y hardware necesarios para llevarlo a cabo.

Serán necesarios conocimientos básicos de electricidad y/o máquinas eléctricas además de en electrónica.

11.2. SEGURIDAD.

El montaje y las pruebas que se realicen mediante el uso del presente hardware y/o software deberá en todo caso respetar las normas de seguridad y realizarse de acuerdo con los procedimientos descritos.

Debido a que el proyecto se desarrolla en todo momento en contacto con fuentes de tensión, se deberán usar los elementos de protección personal pertinentes y bajo la protección de los elementos de protección de una instalación eléctrica particular o industrial.

Se destaca que se debe prestar especial atención a las conexiones eléctricas que en el proyecto se deben realizar y comprobar previamente en el manual de usuario, documento UM1945 que podemos encontrar en la parte de los anexos (ANEXO 1).

11.3. UTILIZACIÓN.

La utilización que a este proyecto se le puede dar está supeditada a las hojas de características técnicas proporcionadas por el fabricante que podemos encontrar en los anexos. Es decir, no se someterá a dicha instalación a condiciones que no hayan sido estudiadas y validadas como viables para los elementos que intervienen en el presente montaje.

11.4. MANTENIMIENTO.

Debido a la reducida complejidad de la que consta el montaje que encontramos en el proyecto no ha lugar a la realización de un mantenimiento extenso. No obstante, dicho mantenimiento estará basado en la comprobación, por un lado, de las conexiones eléctricas que en él se han realizado y en la comprobación rutinaria del estado de la fuente de alimentación, cuyas características encontramos en los anexos.

Por otra parte, se debe realizar una inspección ocular de los elementos mecánicos que intervienen, así como comprobar que no hay ningún elemento que pueda interferir en el funcionamiento del equipo.

Es recomendable que cuando el montaje no esté siendo usado, este sea guardado de manera procedente para evitar su deterioro por elementos como la humedad o el polvo al que podría estar sometido.

12. CONDICIONES PARTICULARES.

12.1. TECNICAS.

12.1.1. P-NUCLEO-IHM001

De acuerdo con lo que se presenta en el manual de usuario UM1945 expuesto en el pertinente anexo, el kit de control formado por el bloque de control constituido por la placa NUCLEO-F302R8 y por el bloque de potencia constituido por la placa basada en el driver L6230 deberá pasar un control de calidad revisando que la serigrafía que en sus componentes se indica es la dispuesta en el citado manual.

El kit usado cumple con las siguientes normas de seguridad:

- IEC 61010-1, EN 61010-1
- UL 61010-1, CSA 61010-1
- UNE-EN 60745
- UNE-EN 61800

12.1.2. MOTOR BULLRUNNING BR2804-1700KV¹

El motor que en este proyecto se usa, el BR2804, es el motor que viene incluido en el kit de STMicroelectronics. Dicho motor, cuyas características se presentan a continuación, deberá pasar una inspección de calidad basada en su inspección ocular y, a poder ser, comprobación de sus bobinados mediante polímetro. Además, para su comprobación, podrá ser usado un osciloscopio para visionar si la forma de onda que generan sus bobinados es correcta.

PARÁMETROS DEL MOTOR	
MOTOR	Bull Running BR2804
KV	1700 kv ⁻¹
V _{DC}	12 V
I _{MAX}	5 'A'
p POLOS	7
RPM _{MAX}	19000 r.p.m.

Tabla 22:Placa de características del motor. Fuente: Autor.



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

IV. ANEXOS

TRABAJO FINAL DEL

Grado en Ingeniería Eléctrica

REALIZADO POR

SERGIO CIFRE GREGORIO

TUTORIZADO POR

FRANCISCO RODRÍGUEZ BALLESTER

CURSO ACADÉMICO: 2019/2020

13. ANEXO 1

En el siguiente anexo se presenta el manual de usuario cuyo código es UM1945 y que acompaña a la documentación del kit STM32 Nucleo Pack “FOC and 6-step motor control” para su correcta puesta en funcionamiento.

En él se encuentra toda la documentación relativa a la placa de control, al bloque de potencia y al motor que se ha usado en este proyecto.

STM32 Nucleo Packs - Motor Control FOC and 6-step solutions for three-phase, low-voltage and low-current motors

Introduction

The STM32 Nucleo Packs P-NUCLEO-IHM001 and P-NUCLEO-IHM002 are motor control kits based on X-NUCLEO-IHM07M1 and NUCLEO-F302R8 boards. The power board with ST L6230 DMOS driver, belonging to STPIN family, provides a motor control solution for 3-phase, low-voltage, DC brushless motor with the addition of the STM32 NUCLEO board through the ST morpho connector (see [Figure 1](#)). The P-NUCLEO-IHM002 comes with a power supply unit (see [Figure 2](#)).

The driver used on power board is the L6230, a DMOS fully integrated driver for 3-phase brushless PMSM motor, assembled in PowerSO36 package, with overcurrent and thermal protection. The NUCLEO-F302R8 provides an affordable and flexible way for users to try out new ideas and build prototypes with STM32 MCU. It does not require any separate probe as it integrates the ST-LINK/V2-1 debugger and programmer.

This document describes the procedure to configure the STM32 Nucleo Packs to run the low-voltage motor included in the package. The evaluation board is fully configurable and ready to support different closed loop controls based on sensorless or sensored mode, and it is compatible with 3-shunt or 1-shunt current sense measuring.

Figure 1. P-NUCLEO-IHM001 Pack



Figure 2. P-NUCLEO-IHM002 Pack



- Pictures are not contractual.

September 2016

www.st.com

Contents

Contents

1	Features	5
2	Ordering information	6
3	Getting started as basic user	6
3.1	System architecture	6
3.2	Building and run the motor control for the STM32 Nucleo Packs	8
3.3	Hardware settings	11
3.4	Upload the firmware example	14
3.4.1	Drag and drop procedure	14
3.4.2	ST-LINK tool	14
4	6-step and FOC control algorithm settings - advanced user	17
4.1	6-step firmware based on X-CUBE-SPN7	17
4.1.1	Firmware architecture overview	17
4.1.2	Firmware parameter settings to spin different BLDC motors	20
4.1.3	Inside the 6-step firmware	20
4.1.4	DAC settings for debug	21
4.2	ST FOC SDK – Configuration guide for the STM32 Nucleo Packs	21
5	Electrical schematics	22
A	Appendix A Federal Communications Commission (FCC) and Industry Canada (IC) Compliance Statements	26
A.1	FCC Compliance Statement	26
A.1.1	Part 15.19	26

A.1.2	Part 15.105	26
A.1.3	Part 15.21	26
A.2	IC Compliance Statement	26
A.2.1	Compliance Statement	26
A.2.2	Déclaration de conformité.....	26
6	Revision history	27

List of tables**List of tables**

Table 1.	Ordering information.....	6
Table 2.	Jumper settings	11
Table 3.	Screw terminal table	11
Table 4.	Connector descriptions.....	12
Table 5.	Document revision history	27

List of figures**List of figures**

Figure 1.	P-NUCLEO-IHM001 Pack	1
Figure 2.	P-NUCLEO-IHM002 Pack	1
Figure 3.	P-NUCLEO-IHM001 Pack main blocks.....	7
Figure 4.	P-NUCLEO-IHM002 Pack main blocks.....	7
Figure 5.	X-NUCLEO-IHM07M1 and NUCLEO-F302R8 assembled.....	8
Figure 6.	Motor connection with X-NUCLEO-IHM07M1.....	9
Figure 7.	Power supply connection for X-NUCLEO-IHM07M1	10
Figure 8.	X-NUCLEO-IHM07M1 – top layer with silk-screen.....	12
Figure 9.	X-NUCLEO-IHM07M1 connectors	13
Figure 10.	ST-LINK utility tool	15
Figure 11.	ST-LINK programming environment.....	16
Figure 12.	6-step firmware – Project workspace on IAR	17
Figure 13.	Architecture of a generic firmware	18
Figure 14.	X-CUBE-SPN7 firmware architecture.....	20
Figure 15.	Current sense conditioning circuit.....	22
Figure 16.	Sensors and shunt resistor circuit.....	23
Figure 17.	L6230 driver and BEMF detection circuit	24
Figure 18.	STM32 MCU pin assignment	25

1 Features

The information listed below shows the main board specification data and parameters set for the X-NUCLEO-IHM07M1 expansion board included in both Nucleo Packs:

- 3-phase driver board for BLDC/PMSM motors
- Nominal operating voltage range from 8 V to 48 V DC
- 2.8 A output peak current (1.4 A RMS)^(a)
- Operating frequency up to 100 kHz
- Non dissipative overcurrent detection and protection
- Cross conduction protection
- Thermal measuring and overheating protection
- Full compatible with ST 6-step or ST FOC control algorithm
- Full support for sensorless and sensored mode
- 3-shunt and 1-shunt configurable jumpers for motor current sensing •Hall / encoder motor sensor connector and circuit
- Debug connector for DAC, GPIOs, etc.
- Potentiometer available for speed regulation
- Fully populated board conception with test points
- User LED
- Compatible with STM32 Nucleo boards • Equipped with ST morpho connectors
- PCB type and size:
 - Material of PCB - FR-4
 - 4-layer layout
 - Copper thickness: 70 µm (external layer), 35 µm (internal layer)
 - Total dimensions of the expansion board: 70 mm x 66 mm

The information listed below shows the power supply electrical characteristics:

- Output characteristics:
 - Nominal voltage 12V
 - Nominal current 2A
 - Minimum voltage 11.4V
 - Maximum voltage: 12.6V
 - Load regulation +-5%
 - Ripple at nominal voltage: 50mVpp

- Input characteristics:
 - Nominal voltage: 100-240Vac
 - Variation voltage range: 90-264Vac
 - Nominal frequency: 50/60Hz
 - Variation frequency: 47-63Hz
-

- a. Device characteristic.

Ordering information

2 Ordering information

To order the STM32 Nucleo Packs refer to [Table 1](#).

Table 1. Ordering information

Order code	Board	DC Power Supply
P-NUCLEO-IHM001	X-NUCLEO-IHM07M1, NUCLEO-F302R8	Not provided
P-NUCLEO-IHM002	X-NUCLEO-IHM07M1, NUCLEO-F302R8	Provided (12 V, 2 A)

3 Getting started as basic user

3.1 System architecture

A generic motor control system as the P-Nucleo-IHM001 and the P-Nucleo-IHM002 can be basically schematized as the arrangement of three main blocks (see [Figure 3](#)):

- **Control block:** its main task is to accept user commands and configuration parameters to drive a motor. The P-Nucleo-IHM001 and the P-NUCLEO-IHM002 Packs are based on the NUCLEO-F302R8 board that provides all digital signals to perform the proper motor driving control algorithm (for instance 6-step or FOC).
- **Power block:** the X-NUCLEO-IHM07M1 is based on 3-phase inverter topology. The core of the power block embedded on board is the driver STSPIN L6230, which contains all the necessary active power and analog components to perform a low-voltage PMSM motor control.
- **PMSM motor:** low-voltage, 3-phase, brushless motor.

The P-Nucleo-IHM002 has a fourth block (see [Figure 4](#)):

- **DC Power supply unit:** it provides the power for the Pack (12 V, 2 A).

Figure 3. P-NUCLEO-IHM001 Pack main blocks

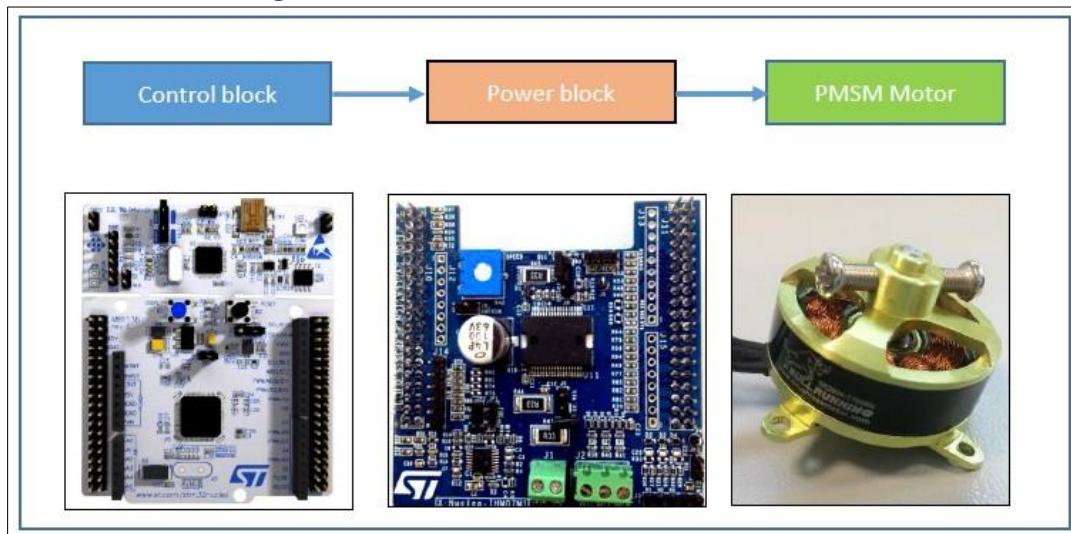
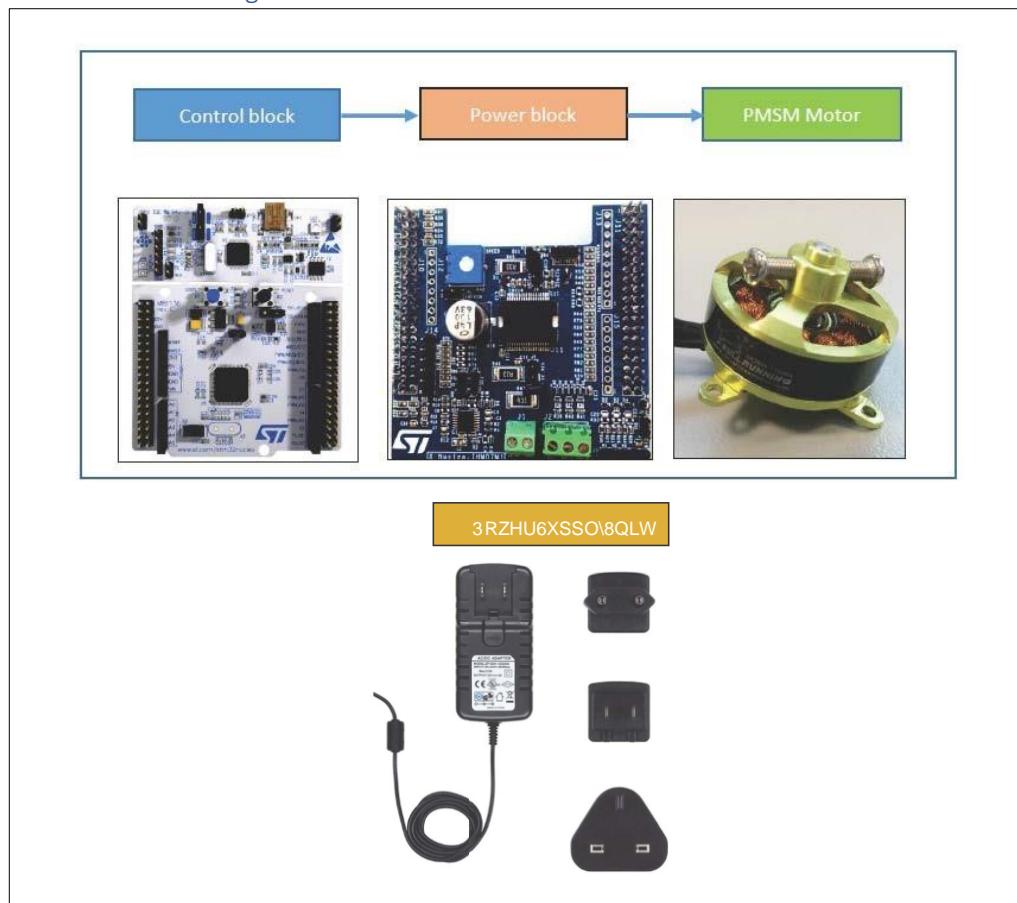


Figure 4. P-NUCLEO-IHM002 Pack main blocks



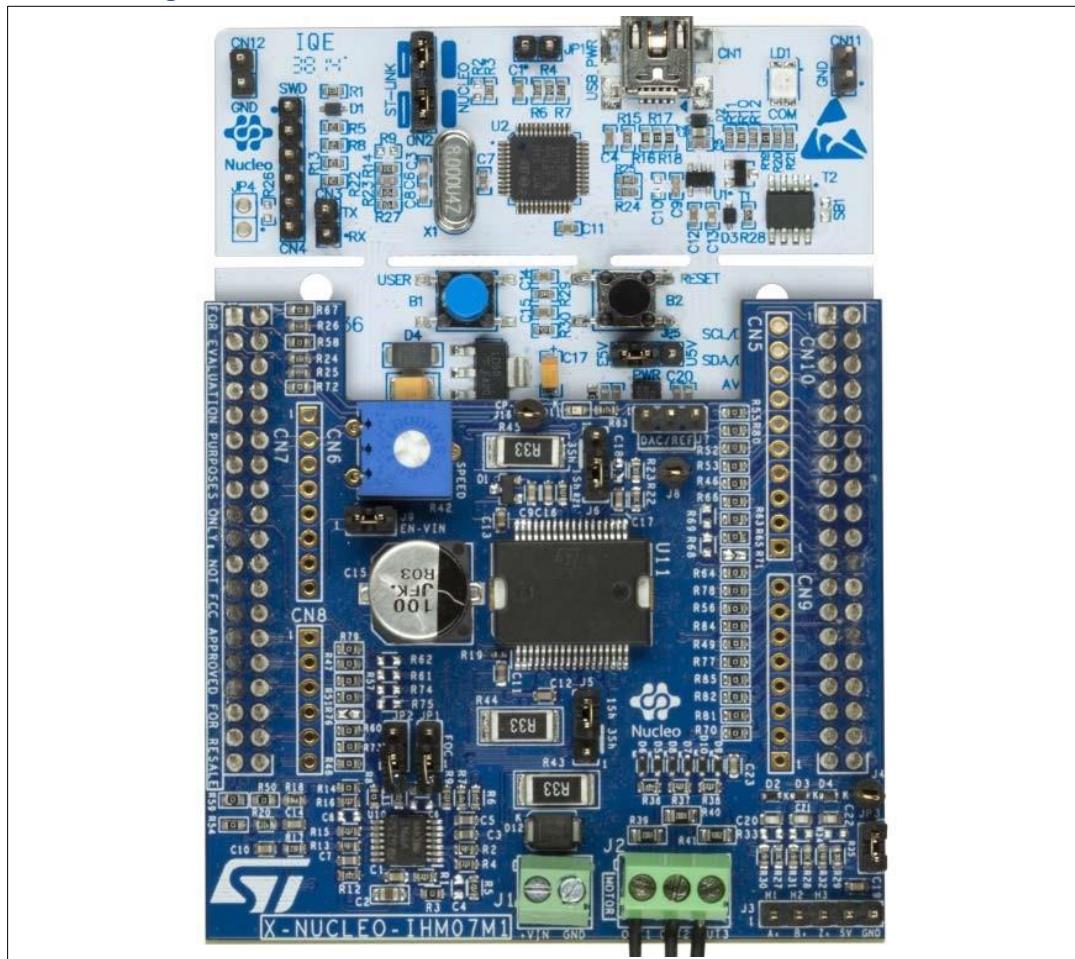
3.2 Building and run the motor control for the STM32 Nucleo Packs

The Nucleo Packs are complete hardware development platforms for the STM32 Nucleo ecosystem to evaluate a motor control solution with a single motor.

For a regular board operating, follow the hardware configuration explained below:

1. The X-NUCLEO-IHM07M1 must be stacked on the NUCLEO-F302R8 board through the ST morpho connectors. There is only one position allowed for this connection, in particular the two buttons on the NUCLEO-F302R8 board (blue button B1 and black button B2) must be kept out, as shown in [Figure 5](#).

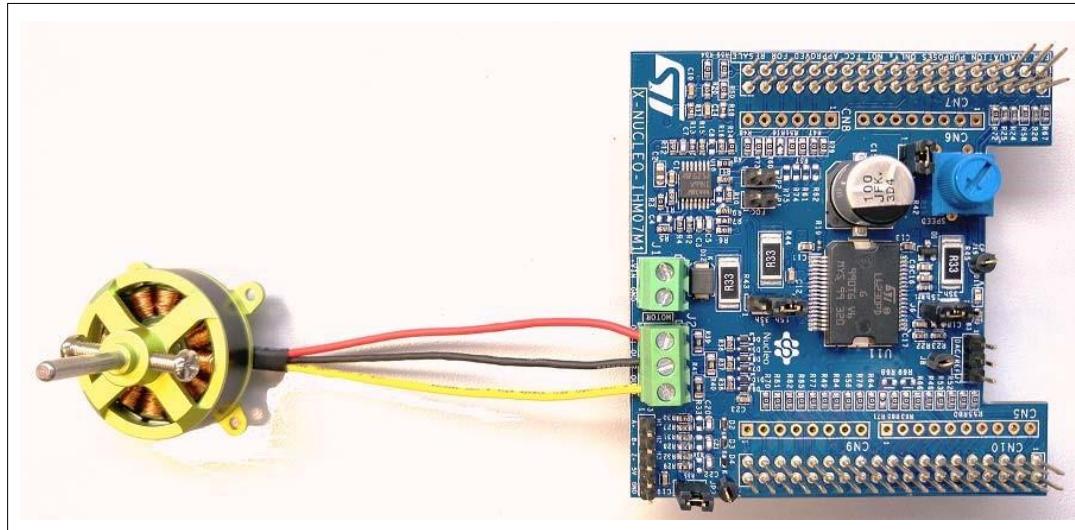
Figure 5. X-NUCLEO-IHM07M1 and NUCLEO-F302R8 assembled



1. The interconnection between the X-NUCLEO-IHM07M1 and the STM32 NUCLEO boards has been designed for a full-compatibility with a lot of control board and no modification of solder bridges is required.
2. Connect the three motor wires U,V,W at J2 connector as shown in the [Figure 6: Motor connection with X-NUCLEO-IHM07M1](#): it is mandatory to connect the yellow wire to OUT3, the black one to OUT2 and the red one to OUT1, to respect

clockwise and counterclockwise motor rotation, according to the firmware implementation.

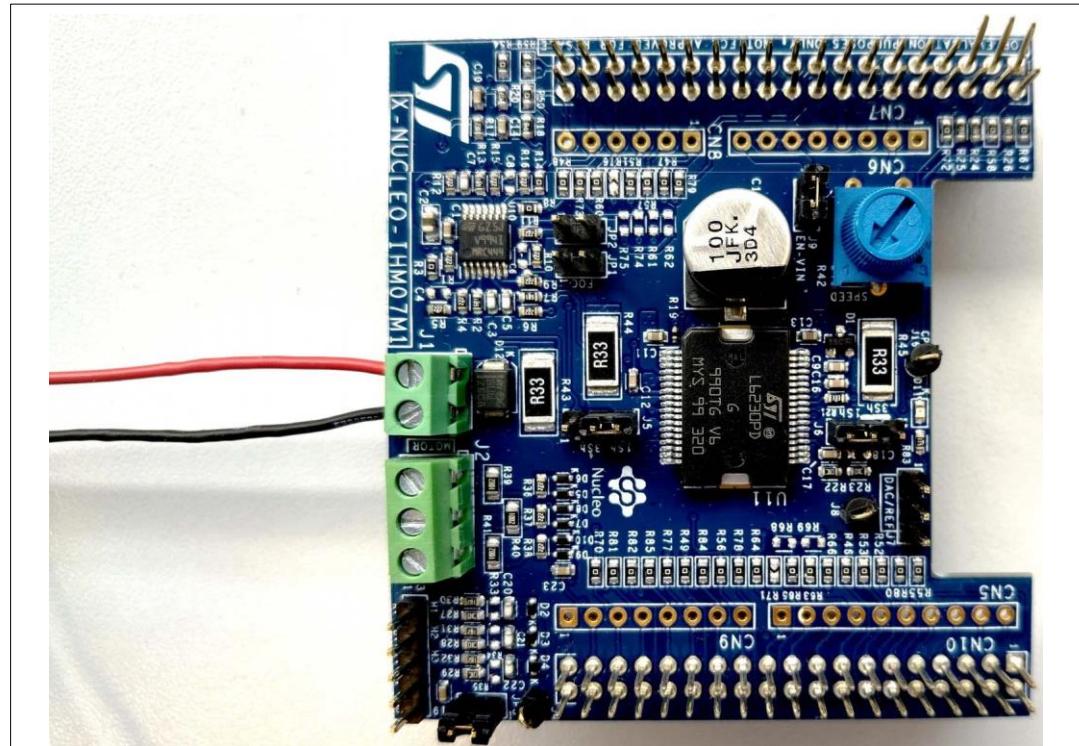
Figure 6. Motor connection with X-NUCLEO-IHM07M1



3. Select the jumper configuration on the power board to choose the desired control algorithm (6-step or FOC) as described below:
 - a) On the NUCLEO-F302R8 board, check the jumper settings: JP1 open, JP5 (PWR) on E5V side, JP6 (IDD) closed.
 - b) On X-NUCLEO-IHM07M1 expansion board:
 - Check jumper settings: J9^(b) closed, JP3 closed
 - For 6-step control set jumper settings as: JP1 and JP2 open, J5&J6 on 1Sh side^(b)
 - For FOC control set jumper settings as: JP1 and JP2 closed, J5&J6 on 3Sh side
4. Connect the DC power supply (use the power supply provided with the board or an equivalent one) on J1^(c) connector and power-on (up to 12 V DC for BR2804 motor included in the P-NUCLEO-IHM002 Pack, as shown in [Figure 7: Power supply connection for X-NUCLEO-IHM07M1](#)).

- b. Supply voltage has to be off before changing the control mode.
- c. For a different motor ($> 12V$) it is mandatory to remove the jumper J9 on power board, before the power-on, to avoid damaging the NUCLEO-F302R8 board. To supply the STM32-NUCLEO from USB, the jumper JP5 must be connected between Pin 1 and Pin 2. For further details on Nucleo settings refer to "STM32 Nucleo-64 boards" User manual (UM1724) available at the www.st.com website.

Figure 7. Power supply connection for X-NUCLEO-IHM07M1



1. The red cable is VCC, the black one is GND.
5. At power-on (or reset) led D11 on X-NUCLEO-IHM07M1 board starts to blink according to the control algorithm selected:
 - twice for FOC control mode
 - 4 times for 6-step control mode

After the confirmation of the control algorithm selected, the system is ready to start:

6. Press the blue button on NUCLEO-F302R8 (B1) and the motor starts spinning.
7. Rotate the potentiometer on X-NUCLEO-IHM07M1 board to regulate the motor speed.

3.3 Hardware settings

The [Table 2](#) shows the jumper configuration on X-NUCLEO-IHM07M1 board (see also [Figure 8: X-NUCLEO-IHM07M1 – top layer with silk-screen](#) and [Figure 9: X-NUCLEO-](#)

IHM07M1 connectors). According to the jumper selection, it is possible to choose the 1-shunt or 3-shunt mode, the current sensing circuit offset level, the hall/encoder with pullup or the external supply for the NUCLEO-F302R8 board.

Table 2. Jumper settings

Jumper	Permitted configuration	Default condition
JP1(1)	Selection for FOC current sensing circuit. The default condition is for 6-step control algorithm	OPEN
JP2(1)	Selection for FOC current sensing circuit. The default condition is for 6-step control algorithm	OPEN
JP3	Selection for pull-up enabling in hall/encoder detection circuit	CLOSED
J9	Selection to supply the Nucleo board through the X-NUCLEO-IHM07M1 ⁽²⁾	CLOSED
J5(3)	Selection for 1-shunt or 3-shunt configuration (single shunt by default)	2-3 CLOSED
J6(3)	Selection for 1-shunt or 3-shunt configuration (single shunt by default)	2-3 CLOSED
J7	Debug connector for DAC	OPEN

1. JP1 and JP2 selection between FOC or 6-step current sensing circuit. They must be both closed (FOC selection) or both open (6-step selection - default setting)
2. It is recommended to verify that power supply voltage is not higher than 12V dc, to not damage the NUCLEO-F302R8 board. For further details on Nucleo settings refer to “STM32 Nucleo-64 boards” User manual (UM1724) available from the www.st.com website.
3. J5 and J6 must have both the same configuration: both 1-2 for three-shunt configuration, both 2-3 for single-shunt configuration. On the silkscreen the correct position for three/single-shunt is indicated. Also the default position is indicated.

The *Table 3* shows the main connector on the X-NUCLEO-IHM07M1 board.

Table 3. Screw terminal table

Screw terminal	Function
J1	Motor power supply input (8V÷48V)
J2	3-phase motor connector (U,V,W)

The X-NUCLEO-IHM07M1 is stacked on ST morpho connectors, male pin headers (CN7 and CN10) accessible on both sides of the board. They can be used to connect this power board to the NUCLEO-F302R8 board. All signals and power pins for MCU are available on the ST morpho connectors. For further details refer to the section 5.12 ST morpho connector of the “STM32 Nucleo-64 boards” User manual (UM1724) available on the www.st.com website.

Figure 8. X-NUCLEO-IHM07M1 – top layer with silk-screen

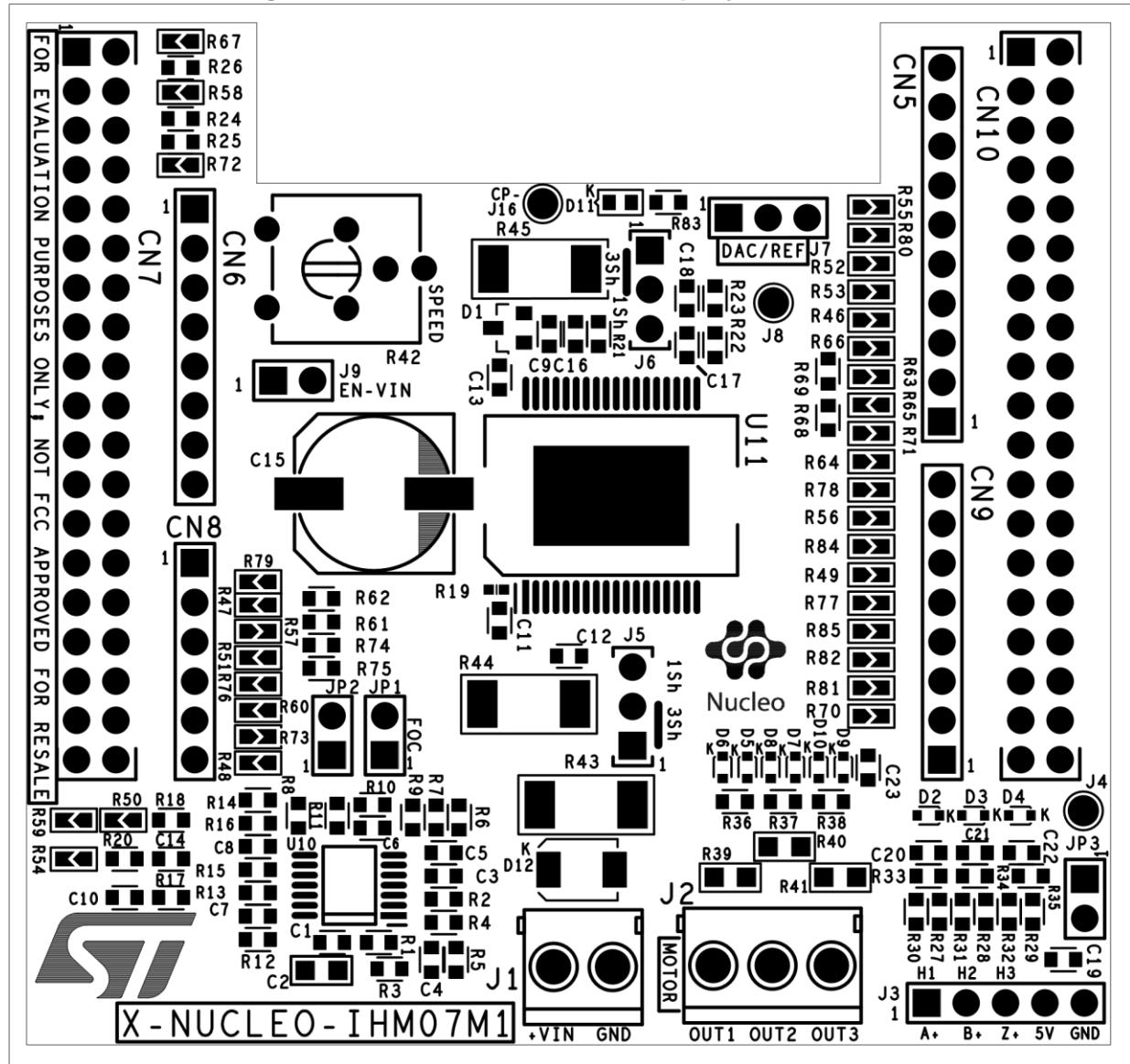


Table 4. Connector descriptions

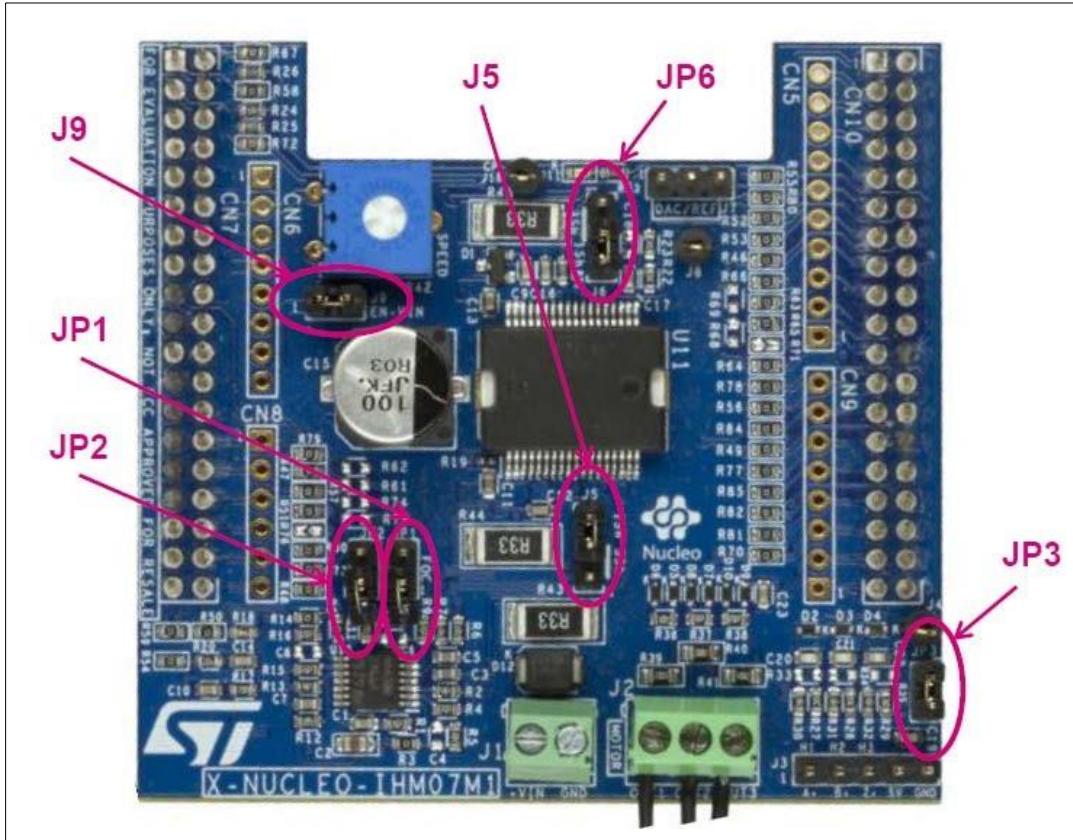
Part reference	Description
CN7	ST morpho connector
CN6	Arduino UNO connector
CN8	Arduino UNO connector
U11	L6230 driver

U10	TSV994IPT op. amp.
J1	Power supply connector

Table 4. Connector descriptions (continued)

Part reference	Description
J9	Enable VIN supply voltage
JP1, JP2	Jumpers for FOC
SPEED	Potentiometer
CN10	ST morpho connector
CN5	Arduino UNO connector
CN9	Arduino UNO connector
J2	Motor connector
J3	Hall/Encoder sensor connector
J7	Debug connector
JP3	External pull-up for sensors
J5, J6	Current measure mode (1Sh/3Sh)
D11	LED status indicator

Figure 9. X-NUCLEO-IHM07M1 connectors



3.4 Upload the firmware example

The example for the motor-control firmware of the Nucleo Packs is pre-loaded in the NUCLEO-F302R8 board. As described in the previous [Section 3.3: Hardware settings](#), it performs two different algorithms to run the motor: 6-step (trapezoidal control) or FOC (Field Oriented Control). This chapter describes the procedure to reload the firmware demonstration inside the NUCLEO-F302R8 board, to restart by the default condition. There are two ways to do it:

- Drag and drop procedure (suggested), see [Section 3.4.1](#)
- Through ST-LINK tool (free download available from the ST web site: www.st.com), see [Section 3.4.2](#)

3.4.1 Drag and drop procedure

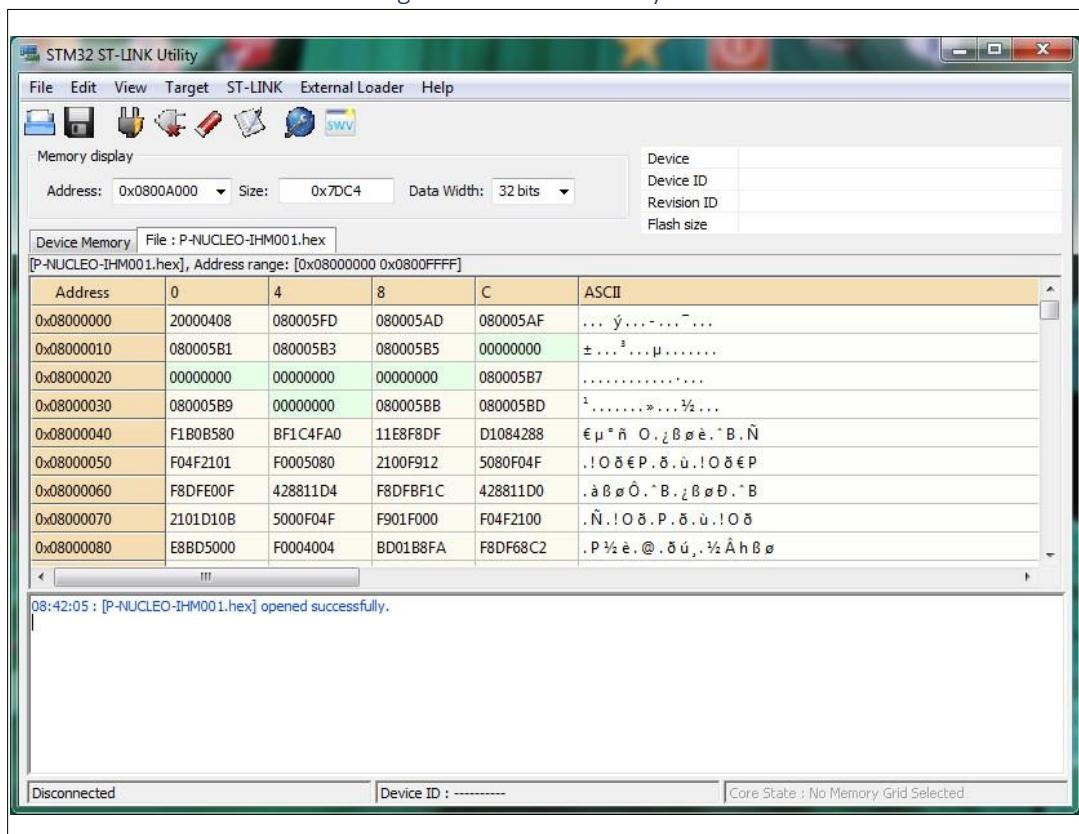
1. Install ST-LINK drivers from the www.st.com website.
2. On the NUCLEO-F302R8 board put JP5 jumper in U5V position.
3. Plug the NUCLEO-F302R8 board to the host PC using a micro USB cable. If the STLINK driver is correctly installed, it is recognized as an external memory device called "NUCLEO" or similar.

4. Take the binary file of the firmware demonstration (P-NUCLEO-IHM001.bin) and drag and drop the file into the "NUCLEO" device, listed inside the list of the disk drives (this is showed by clicking the Start button of Windows OS interface), contained into XCUBE-SPN7 firmware pack.
5. Wait until flashing is complete.

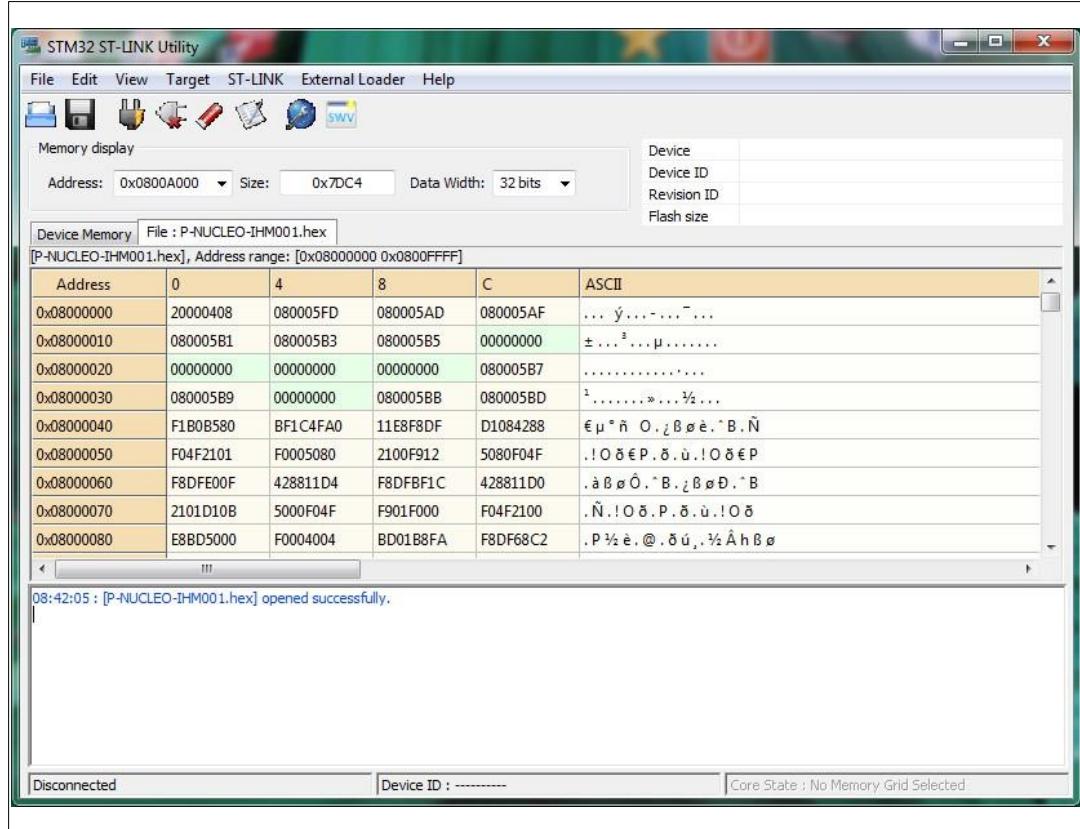
3.4.2 ST-LINK tool

1. Open "ST-LINK tool".
2. Connect the NUCLEO-F302R8 board to the PC with a USB Type-A to Mini-B cable through the USB connector (CN1) on the NUCLEO-F302R8 board.
3. Make sure that the embedded ST-LINK/V2 is configured for in-system programming on the NUCLEO-F302R8 board (both CN2 jumpers ON).
4. Use “P-NUCLEO-IHM001.bin” binary file to upload the code inside STM32, the window will appear as shown in [Figure 10](#).

Figure 10. ST-LINK utility tool



5. Click on Target and Program buttons (see [Figure 11: ST-LINK programming environment](#)).

Figure 11. ST-LINK programming environment

6. Click on Start to upload the firmware.

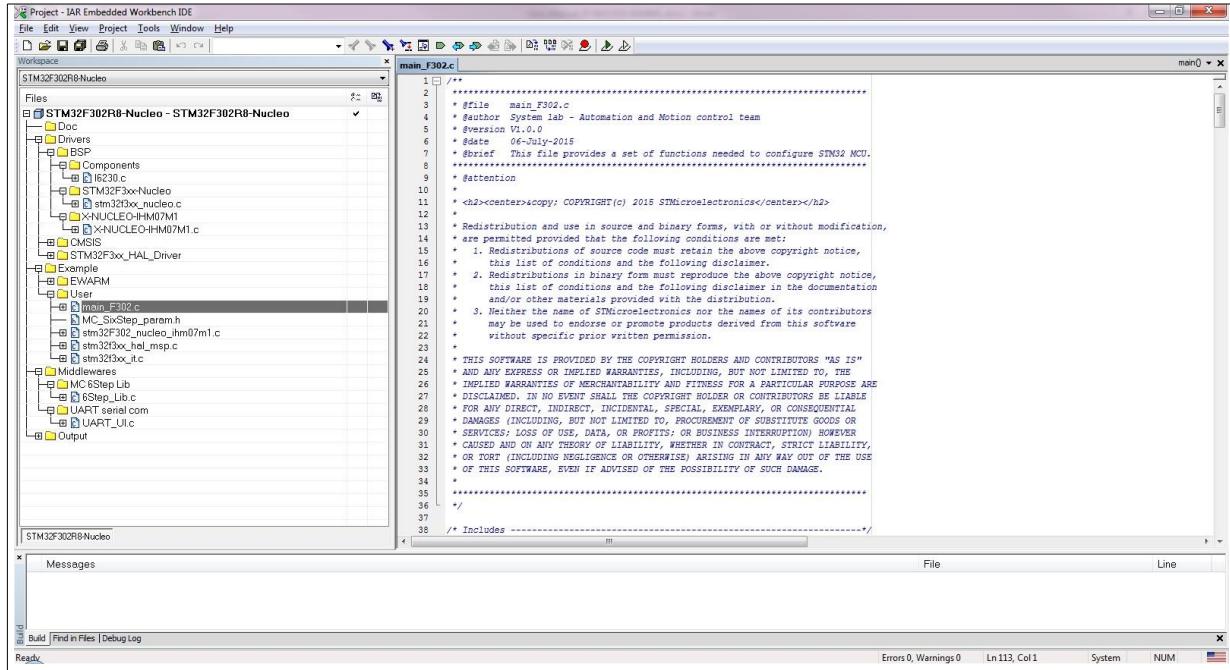
4 6-step and FOC control algorithm settings - advanced user

4.1 6-step firmware based on X-CUBE-SPN7

4.1.1 Firmware architecture overview

The firmware example in X-CUBE-SPN7 is provided for three different IDE tools, in this case the IARTM IDE workspace appears as shown in *Figure 12*.

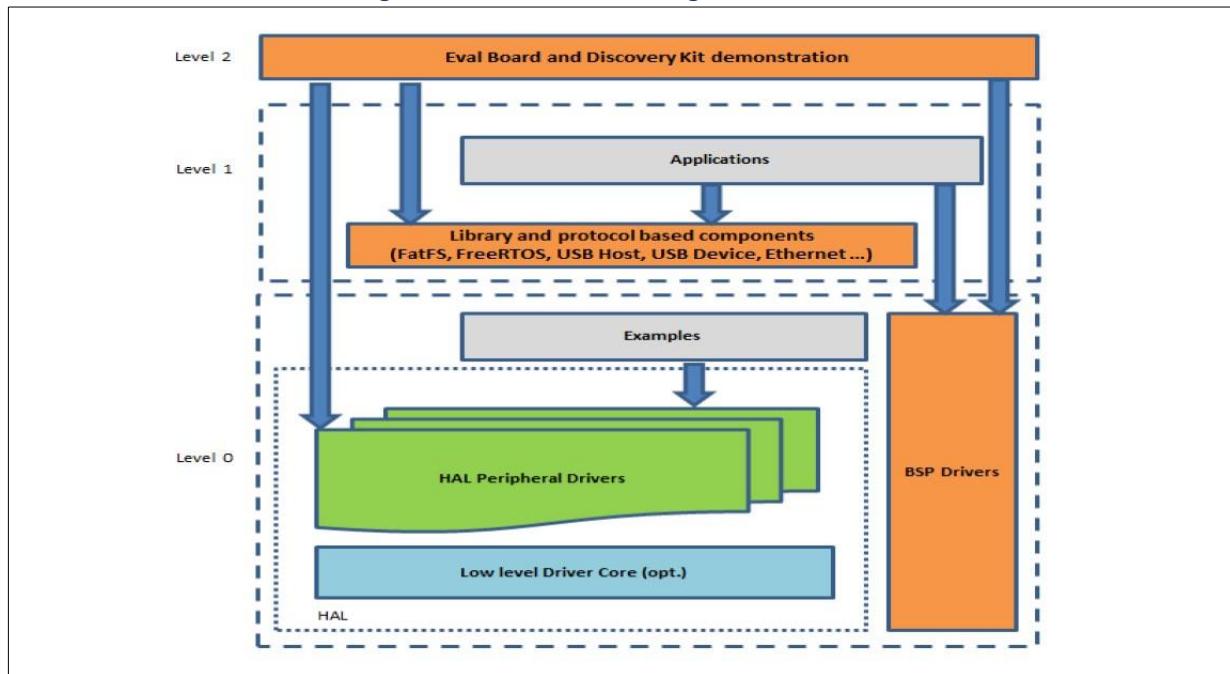
Figure 12. 6-step firmware – Project workspace on IAR



The firmware solution is built around three independent levels that easily interact as described in the *Figure 13: Architecture of a generic firmware* below:

6-step and FOC control algorithm settings - advanced user

Figure 13. Architecture of a generic firmware



Level 0:

This level is divided into three sub-layers:

- **Board Support Package (BSP):** this layer offers a set of APIs relative to the hardware components in the hardware boards (Audio codec, IO expander, Touchscreen, SRAM driver, LCD drivers. etc...) and it is composed of two parts:
 - Component: is the driver of the external device on the board and not related to the STM32. The component driver provides specific APIs for the BSP driver of external components and it is portable on any board. In this case (X-NUCLEO-IHM07M1) the ST L6230 driver has been provided inside the firmware package.
 - BSP driver: it allows to link the component driver to a specific board and provides a set of friendly used APIs. The APIs naming rule is `BSP_FUNCT_Action()`: ex. `BSP_LED_Init()`, `BSP_LED_On()`.

It is based on modular architecture, allowing to port it easily on any hardware by just implementing the low-level routines.

- **Hardware Abstraction Layer (HAL):** this layer provides the low-level drivers and the hardware interfacing methods to interact with the upper layers (application, libraries and stacks). It provides a generic, multi-instance and functionality-oriented APIs which permit to offload the implementation of the user application, by providing ready-to-use process. For example, for the communication peripherals (I²S, UART...) it provides APIs allowing the initialization and configuration of the peripheral, the

management of the data transfer based on polling, the interrupt or DMA process, and the management of the communication errors that may raise during the communication. The HAL drivers APIs are splitted in two categories: generic APIs which provide common and generic functions to all the STM32 Series and extension APIs, which provide specific and customized functions for a specific family or a specific part number.

- **Examples of basic-peripheral usage:** this layer encloses the examples built over the STM32 peripherals using only the HAL and BSP resources.

Level 1:

This level is divided into two sub-layers:

- **Middleware components:** set of libraries covering USB host and device libraries, STemWin, FreeRTOS, FatFS, LwIP, and PolarSSL. Horizontal interactions between the components of this layer is done directly by calling the feature APIs, while the vertical interaction with the low-level drivers is done through specific callbacks and static macros, implemented in the library system call interface. For example, the FatFs implements the disk I/O driver to access the microSD driver or the USB Mass Storage Class. The middleware components provided with the X-CUBE-SPN7 package contain the core of the motor-control algorithm: 6-step library (6Step_Lib.c/h) and interface files (stm32f302_ihm07m1.c/h). The interface file includes the map of the STM32 MCU peripherals used (for instance, advanced TIMx, general TIMx, ADCx, DACx, UART etc.) to operate with the MC SixStep library. This file must be updated according with the modification done by the user, through the STM32CubeMX software (i.e. if channels or peripherals are modified respect to the default configuration). At middleware level a serial communication based on UART with external PC terminal emulator has been included into the X-CUBE-SPN7 package (see the UART_UI.c/h).
- **Examples based on the middleware components:** each middleware component comes with one or more examples (called also Applications), showing how to use it. Integration examples that use several middleware components are provided as well. This folder is created with the STM32CubeMX software and it contains the main file for firmware initialization (peripherals, MC_6Step and UART communication). In addition a specific file (MC_SixStep_param.h) has been added to provide the complete list of parameters for the MC-6Step library at application level. Inside the stm32fxxx_it.c file all interrupt handlers are defined and in particular it contains the starting point for UART communication.

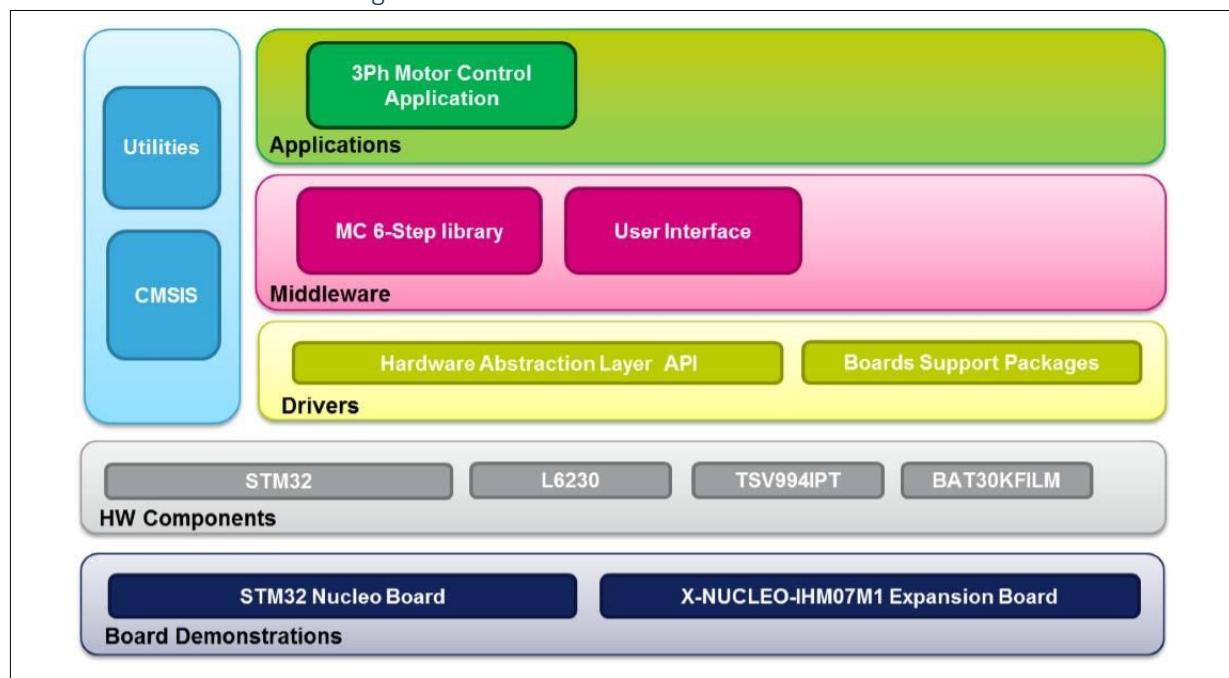
Level 2:

This level is composed of a single layer, which is a global real-time and graphical demonstration based on the middleware service layer, the low-level abstraction layer and the basic peripheral usage applications for board-based functionalities.

The [Figure 14: X-CUBE-SPN7 firmware architecture](#) shows the firmware architecture of the X-CUBE-SPN7 package, also including the hardware-component level.

6-step and FOC control algorithm settings - advanced user

Figure 14. X-CUBE-SPN7 firmware architecture



4.1.2 Firmware parameter settings to spin different BLDC motors

The firmware example provided for the STM32 Nucleo Packs is tuned for low-inductance/high-speed motor (reference part: Bull-Running model BR2804-1700kV, 11.1Vdc, 5A, 7 pole pairs, 19000 MaxRPM speed). The X-CUBE-SPN7 firmware package is developed to simplify the way to spin a different kind of motors with only few changes. In this case, a header file (MC_SixStep_param.h) contained inside the X-CUBE-SPN7 package, includes several parameters organized in two sections: basic and advanced. In the first section it is possible to change the main parameters: for instance, motor-pole pairs, clockwise or counter clockwise motor direction, target speed or potentiometer selection. In the advanced section, it is possible to set the PI parameters, to define the alignment time or the acceleration rate during startup, to change the zero-crossing threshold and a lot of parameters useful to fine-tune the system.

In case of a different motor connected or different load condition, after the reset or poweron, the firmware is able to reduce the acceleration rate if startup fails and, at the next push-button event (on NUCLEO-F302R8 board), a new-speed-profile value will be generated.

After this changes the firmware is ready to be recompiled with the IDE tool and uploaded in the NUCLEO-F302R8 board.

4.1.3 Inside the 6-step firmware

The main.c file contains the starting point of 6-step library for motor control, in particular the MC_SixStep_INIT() configures the basic structure of MC driver, based on 6-step control algorithm and the header file (6Step_Lib.h) provides the connection between the application layer with this driver. The stm32f3xx_it.c file includes the entry point for UART communication and the handling code for BKIN interrupt. Inside the example folder the stm32F302_nucleo_ihm07m1.c contains all the MCU related functions, header files and the complete list of the peripherals used.

The core of 6-step algorithm is contained inside the middleware folder (6Step_Lib.c) and its header file has the complete list of API functions available for the user at application level, for instance: MC_StartMotor(), MC_StopMotor() or MC_SetSpeed(value).

At the base of MC driver three main tasks run at different frequency and with different priority level, according to the specific function to cover, in particular:

1. **High-frequency task**: it is for the high-frequency function (advanced TIMx PWM generation, ADC reading) and it is managed at highest priority. This frequency is changeable through the STM32CubeMX software (i.e. TIM1_ARR).
2. **Medium-frequency task**: it is for the medium-frequency function (general TIMx for step timing) and it is managed at medium priority. This frequency is changeable through the STM32CubeMX software (i.e. TIM6_ARR for NUCLEO-F302R8 board).
3. **Low-frequency task**: it is for the low-frequency function (SysTick timer for Speed Loop timing) and it is managed at the lowest priority. The MC_SysTick_SixStep_MediumFrequencyTask() is called at SysTick frequency (1msec), while the speed loop function is managed by SPEED_LOOP_TIME (msec) defined in MC_SixStep_param.h file.

4.1.4 DAC settings for debug

For debug purpose it is possible to use the DAC peripheral and configure the 6-step library, to drive the signal. The function SET_DAC_value(dac_value) allows to convert the variable "dac_value" in 16-bit format (with no sign) in analog signal so it is possible to monitor for instance the motor speed (set by default) or the potentiometer value through an external oscilloscope attached at the configured pin. By default PA4 pin is configured and it is accessible through the ST morpho connector and it is typically connected to DAC_CH1

(NUCLEO-F302R8 board). Other pin are available at J7 connector according with the NUCLEO-F302R8 board used. For pin modification remember to modify also the

stm32F302_nucleo_ihm07m1.h file. The DAC peripheral is on by default but it is possible to disable it through the MC_SixStep_param.h.

4.2 ST FOC SDK – Configuration guide for the STM32 Nucleo Packs

The demonstration board supports also the ST FOC library and no hardware modification is required to run the motor with this control algorithm. In this case the board must be configured for the current sensing (1-shunt or 3-shunt mode) selecting the JP1, JP2 jumpers, according to the jumper settings shown in *Table 2: Jumper settings*. It is also available the support of MC Workbench software through the USB cable used for the Nucleo programming. In this case it is recommended to configure the FOC SDK for USART2 on PA2 and PA3 pin.

For further information about ST FOC SDK library refer to “*STM32 PMSM FOC Software Development Kit*” Databrief (DB2187) at the www.st.com website.

Electrical schematics

Figure 15. Current sense conditioning circuit

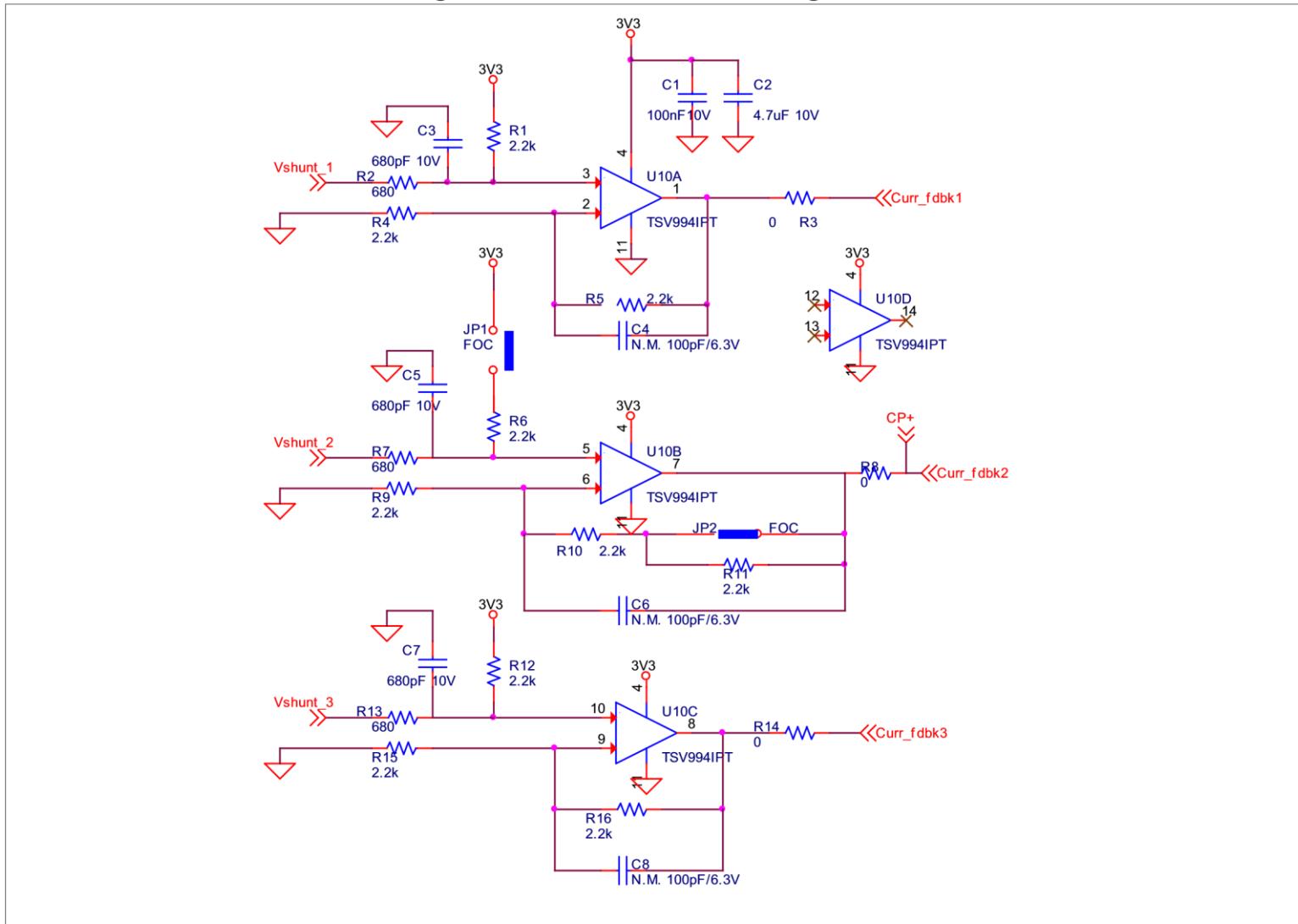


Figure 16. Sensors and shunt resistor circuit

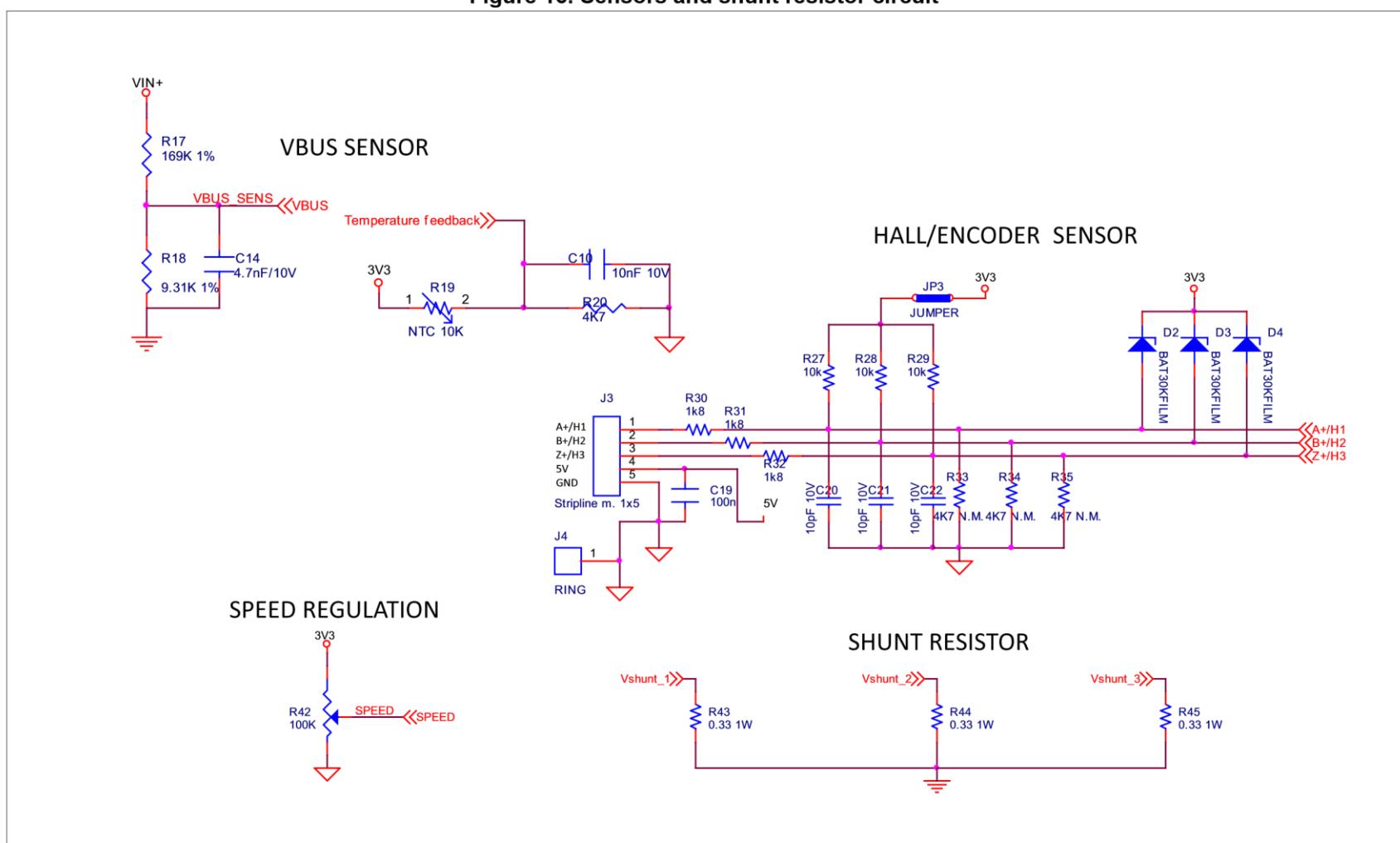


Figure 17. L6230 driver and BEMF detection circuit

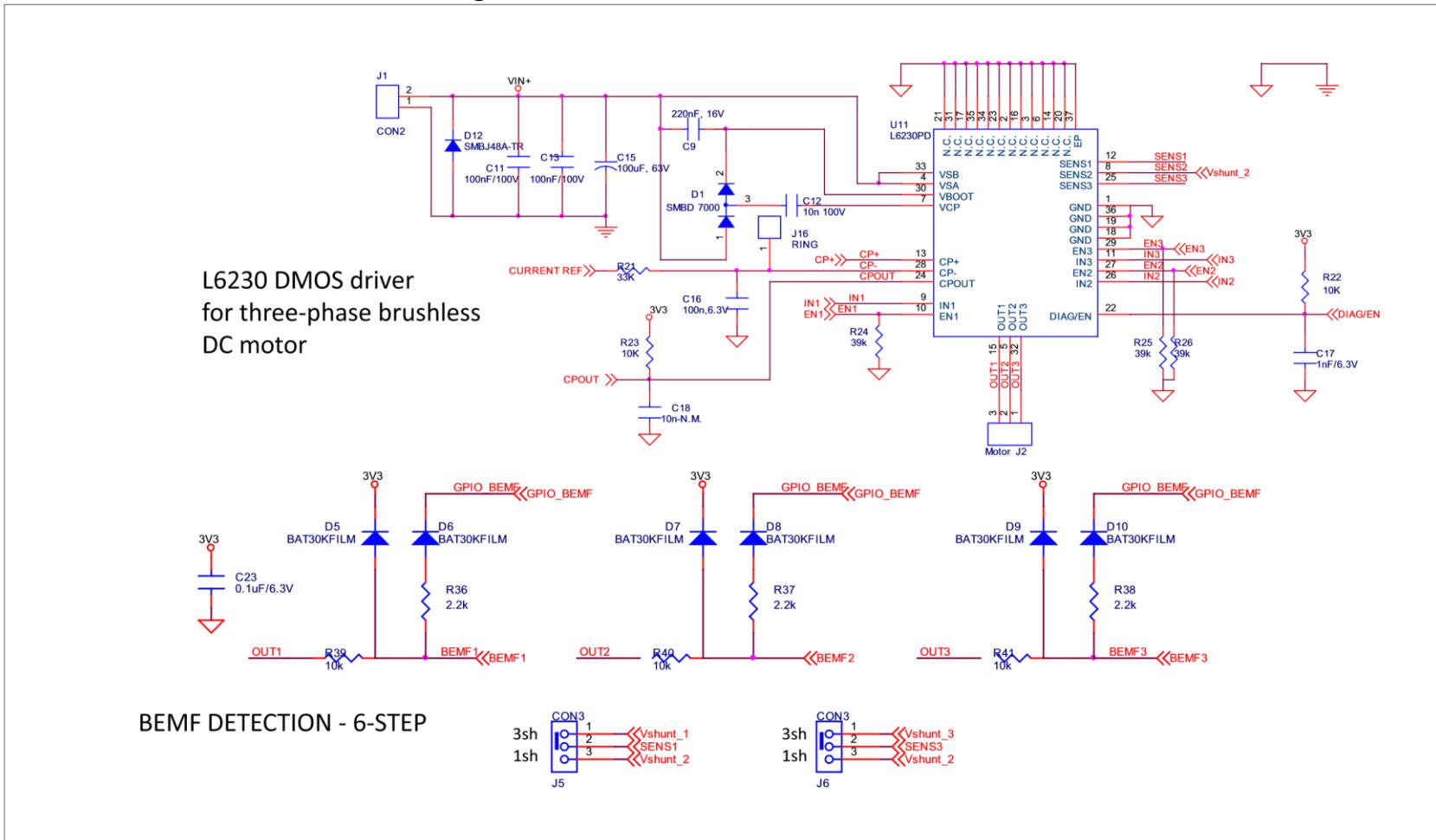
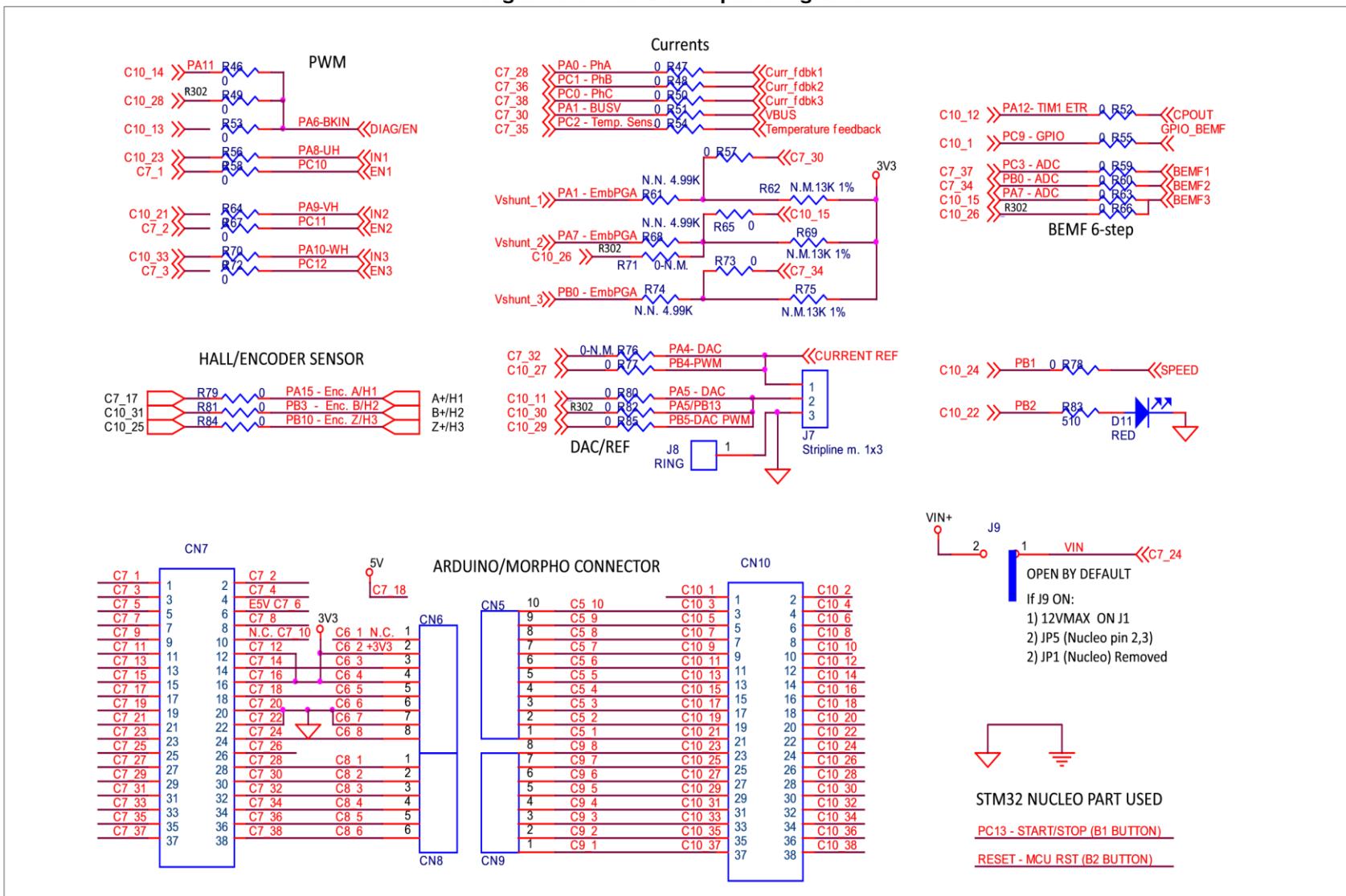


Figure 18. STM32 MCU pin assignment



Appendix A Federal Communications Commission (FCC) and Industry Canada

(IC) Compliance Statements

A.1 FCC Compliance Statement

A.1.1 Part 15.19

This device complies with Part 15 of the FCC Rules. Operation is subject to the following two conditions: (1) this device may not cause harmful interference, and (2) this device must accept any interference received, including interference that may cause undesired operation.

A.1.2 Part 15.105

This equipment has been tested and found to comply with the limits for a Class B digital device, pursuant to part 15 of the FCC Rules. These limits are designed to provide reasonable protection against harmful interference in a residential installation. This equipment generates uses and can radiate radio frequency energy and, if not installed and used in accordance with the instructions, may cause harmful interference to radio communications. However, there is no guarantee that interference will not occur in a particular installation. If this equipment does cause harmful interference to radio or television reception, which can be determined by turning the equipment off and on, the user is encouraged to try to correct the interference's by one or more of the following measures:

- Reorient or relocate the receiving antenna.
- Increase the separation between the equipment and the receiver.
- Connect the equipment into an outlet on a circuit different from that to which the receiver is connected.
- Consult the dealer or an experienced radio/TV technician for help.

A.1.3 Part 15.21

Any changes or modifications to this equipment not expressly approved by STMicroelectronics may cause harmful interference and void the user's authority to operate this equipment.

A.2 IC Compliance Statement

A.2.1 Compliance Statement

Industry Canada ICES-003 Compliance Label: CAN ICES-3 (B)/NMB-3(B)

A.2.2 Déclaration de conformité

Étiquette de conformité à la NMB-003 d'Industrie Canada: CAN ICES-3 (B)/NMB-3(B)



6 Revision history

Table 5. Document revision history

Date	Revision	Changes
22-Sep-2015	1	Initial version
01-Sep-2016	2	Updated <i>Introduction</i> , <i>Section 3.1: System architecture</i> , <i>Section 3.2: Building and run the motor control for the STM32 Nucleo Packs</i> to introduce the power supply unit.



UM1945

IMPORTANT NOTICE – PLEASE READ CAREFULLY

STMicroelectronics NV and its subsidiaries (“ST”) reserve the right to make changes, corrections, enhancements, modifications, and improvements to ST products and/or to this document at any time without notice. Purchasers should obtain the latest relevant information on ST products before placing orders. ST products are sold pursuant to ST’s terms and conditions of sale in place at the time of order acknowledgement.

Purchasers are solely responsible for the choice, selection, and use of ST products and ST assumes no liability for application assistance or the design of Purchasers’ products.

No license, express or implied, to any intellectual property right is granted by ST herein.

Resale of ST products with provisions different from the information set forth herein shall void any warranty granted by ST for such product.

ST and the ST logo are trademarks of ST. All other product or service names are the property of their respective owners.

Information in this document supersedes and replaces information previously supplied in any prior versions of this document.

© 2016 STMicroelectronics – All rights reserved



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

V. BIBLIOGRAFÍA.

TRABAJO FINAL DEL

Grado en Ingeniería Eléctrica

REALIZADO POR

SERGIO CIFRE GREGORIO

TUTORIZADO POR

FRANCISCO RODRÍGUEZ BALLESTER

CURSO ACADÉMICO: 2019/2020

14. BIBLIOGRAFÍA

1. Control, Trinamic Motion. TMC4671-ES DATASHEET. [En línea] Febrero de 2019. <https://www.trinamic.com/products/integrated-circuits/details/tmc4671-es/>.
2. Packt. <https://www.packtpub.com/>. [En línea] [Citado el: 16 de Octubre de 2019.] https://subscription.packtpub.com/book/hardware_and_creative/9781788477512/1/ch01lv1sec12/types-of-motors-used-for-drones.
3. Santaolalla, Javier. Date un Vlog. [En línea] <https://www.youtube.com/watch?v=Y-XbsWEjyp0>.
4. The Editors of Encyclopaedia Britannica. ENCYCLOPÆDIA BRITANNICA. [En línea] [Citado el: 23 de Mayo de 2020.] <https://www.britannica.com/science/Lorentz-force>.
5. Giménez Valentín, Marcos Herminio, Guasp, Jaime Riera y Garayo, Ana Vidaurre. *FUNDAMENTOS ELECTROMAGNÉTICOS DE LA INGENIERÍA*. Valencia : Editorial Universitat Politècnica de València, 2014.
6. Urone, Paul Peter y Roger Hinrichs. BIOT-SAVART LAW. [En línea] 13 de Octubre de 2019. [Citado el: 16 de Octubre de 2019.] [https://phys.libretexts.org/Bookshelves/University_Physics/Book%3A_University_Physics_\(OpenStax\)/Map%3A_University_Physics_II_-_Thermodynamics%2C_Electricity%2C_and_Magnetism_\(OpenStax\)/12%3A_Sources_of_Magnetic_Fields/12.1%3A_The_Biot-Savart_Law](https://phys.libretexts.org/Bookshelves/University_Physics/Book%3A_University_Physics_(OpenStax)/Map%3A_University_Physics_II_-_Thermodynamics%2C_Electricity%2C_and_Magnetism_(OpenStax)/12%3A_Sources_of_Magnetic_Fields/12.1%3A_The_Biot-Savart_Law).
7. Mora, Jesús Fraile. *ELECTROMAGNETISMO Y CIRCUITOS ELÉCTRICOS*. Madrid : Concepción Fernández Madrid, 2005.
8. Fisicalab. LEY DE BIOT-SAVART. [En línea] [Citado el: 16 de Octubre de 2019.] <https://www.fisicalab.com/apartado/campo-magnetico-creado-corriente-electrica#contenidos>.
9. Pérez, Elías J. Hurtado. *MÁQUINAS ELÉCTRICAS DINÁMICAS*. Valencia : Saimel Ediciones, 2007.
10. Mora, Jesus Fraile. *MÁQUINAS ELÉCTRICAS*. Madrid : Concepción Fernández Madrid, 2003.
11. Yedamale, Padmaraja. Microchip AN885. *BRUSHLESS DC (BLDC) MOTOR FUNDAMENTALS*. [En línea] <http://ww1.microchip.com/downloads/en/appnotes/00885a.pdf>.
12. Parsons, Richard. Selecting the best pole and slot combination for a BLDC (PMSM) motor with concentrated windings. [En línea] Enero de 2019. <https://things-in-motion.blogspot.com/2019/01/selecting-best-pole-and-slot.html>.
13. Emetor.com. Winding factor. [En línea] <https://www.emetor.com/glossary/winding-factor/>.
14. S. E. Skaar, Ø. Krøvel, R. Nilssen. Distribution, coil-span and winding factors for PM machines with concentrated windings. [En línea] <http://www.elkraft.ntnu.no/eno/Papers2006/icem-skaar-krovel-nilssen06.pdf>.

15. Control de máquinas y accionamientos eléctricos. *Sesión 12. Teoría del PMSM*. Valencia. : s.n., 2018.
16. RC Learning. HOW DO BRUSHLESS RC MOTORS WORK. [En línea] 2015.
<http://learningrc.com/quadcopter-motors/>.
17. —. BRUSHLESS MOTOR KV CONSTANT EXPLAINED. [En línea] 2015.
<http://learningrc.com/motor-kv/>.
18. Ryan. RADIO CONTROL INFO. [En línea] Agosto de 2018.
<http://www.radiocontrolinfo.com/brushless-inrunner-vs-outrunner-motor/>.
19. GreatScott. *ELECTRONICS BASICS #28: IGBT AND WHEN TO USE THEM*. [Video de Youtube] 2017.
20. ModelflightRC. ModelflightRC. *WHAT IS AN ELECTRONIC SPEED CONTROLLER AND HOW DOES IT DIFFER FROM BRUSHED TO BRUSHLESS MOTORS?* [En línea] Febrero de 2019.
[Citado el: 27 de Noviembre de 2019.] <https://www.modelflight.com.au/blog/electronic-speed-controllers>.
21. How To Mechatronics. *HOW TO MECHATRONICS*. [En línea]
<https://howtomechatronics.com/how-it-works/how-brushless-motor-and-esc-work/>.
22. KDEDirect. TOP 6 INDUSTRY APPLICATIONS OF BRUSHLESS MOTORS. [En línea] 07 de Febrero de 2018. [Citado el: 02 de Diciembre de 2019.]
<https://www.kdedirect.com/blogs/news/6-industry-applications-brushless-motors>.
23. Texas Instruments. *The Difference between PMSM & BLDC Motor*. [En línea]
https://e2e.ti.com/cfs-file/_key/communityserver-discussions-components-files/171/BLDC-vs-PMSM.pdf.
24. Stijn Derammelaere, Michiel Haemers, Jasper De Viaene, Florian Verbelen, Kurt Stockman. Core. [En línea] <https://core.ac.uk/download/pdf/147045512.pdf>.
25. Rippel, Wally. Tesla, Induction versus DC brushless motor. [En línea] Enero de 2007.
https://www.tesla.com/es_ES/blog/induction-versus-dc-brushless-motors?redirect=no.
26. Roman, Tim. AC versus BLDC Motors. [En línea] Agosto de 2015.
<https://www.pfonline.com/articles/ac-versus-bldc-motors>.
27. Dirjish, Mat. ElectronicDesign. [En línea] Febrero de 2012.
<https://www.electronicdesign.com/technologies/electromechanical/article/21796048/what-s-the-difference-between-brush-dc-and-brushless-dc-motors>.
28. Cruz, Pedro Ponce. *Máquinas Eléctricas. Técnicas Modernas de Control*. Ulzama : Alfaomega, 2016. 978-607-622-688-9.
29. Zambada, Jorge y Deb, Debraj. Microchip AN1078. *SENSORLESS FIELD ORIENTED CONTROL OF A PMSM*. [En línea]
30. Microchip. Microchip AN2757. *SENSORED (ENCODER-BASED) FIELD ORIENTED CONTROL OF THREE-PHASE PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR (PMSM)*. [En línea]
31. —. SENSORLESS FIELD ORIENTED CONTROL (FOC) FOR PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTORS (PMSM). *Microchip Web Seminars*. [En línea]

https://www.microchip.com/stellent/groups/SiteComm_sg/documents/Training_Tutorials/en532365.pdf.

32. Lavanya, Y., y otros. SENSORLESS VECTOR CONTROL OF BLDC USING EXTENDED KALMAN FILTER. [En línea]

https://www.researchgate.net/publication/281573525_Sensorless_Vector_Control_of_BLDC_Using_Extended_Kalman_Filter.

33. ST. 3-phase Field Oriented Control (FOC). [En línea]

https://www.st.com/content/st_com/en/applications/industrial-motor-control/pmsm-bldc-motor/3-phase-field-oriented-control-foc.html.

34. ST Microelectronics. STM32 Nucleo pack P-NUCLEO-IHM001 . [En línea] [Citado el: 20 de Marzo de 2020.] <https://www.st.com/en/evaluation-tools/stm32-nucleo-expansion-boards.html#products>.

35. —. L6230. [En línea] [Citado el: 26 de Mayo de 2020.] <https://www.st.com/en/motor-drivers/l6230.html>.

36. —. X-CUBE-MCSDK. [En línea] [Citado el: 26 de Mayo de 2020.]

<https://www.st.com/en/embedded-software/x-cube-mcsdk.html>.

37. —. STM32CubeMX. [En línea] [Citado el: 26 de Mayo de 2020.]

<https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubemx.html>.

38. —. *Getting started with STM32CubeMX*. [YouTube]

39. IAR Systems. IAR Embedded Workbench. [En línea] [Citado el: 26 de Mayo de 2020.]

<https://www.iar.com/iar-embedded-workbench/>.

40. COITI. CALCULA EL PRECIO-HORA DE TU TRABAJO. [En línea]

<https://www.coitibi.net/servicios-profesionales/ejercicio-profesional/calcula-precio-hora-de-tu-trabajo>.

