



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL
Facultad Regional Bahía Blanca

Ingeniería Electrónica

Proyecto Final

***Diseño y desarrollo de un controlador
de motor BLDC de 9 kW para una e-bike***

Autores

Sr. Pedro Manuel Martín

Sr. Christian Ayarde

Tutores

Mg. Guillermo R. Friedrich

Ing. Adrián H. Laiuppa

Bahía Blanca, 9 de septiembre de 2022

Índice

Resumen	2
1. Introducción	3
2. Características básicas	4
3. Mercado	5
4. Infraestructura para el desarrollo	6
4. Tipo de Control utilizado en el Controlador.	7
5. Diagrama en Bloques del Controlador	8
5.1 Diseño del esquemático	8
5.2. Circuito del microcontrolador	10
5.3. Circuito de regulación de tensión de los circuitos.	11
5.4. Modulo controlador de compuertas del puente Half bridge trifásico	12
5.5. Circuito de sensado de corriente de fase	13
5.6. Entradas digitales del sistema	14
5.7. Circuito de sensado de temperatura de MOSFETs de potencia.	14
5.8. Circuito de sensado de tensión de fase	15
5.9. Circuito de puente Half bridge trifásico (Power Stage)	15
6. Diseño del PCB	17
7. Conexionado	19
8. Tecnología utilizada	20
9. Criterios de diseño	21
10. Adquisición de componentes	22
11. Ensamble	23
12. Firmware	25
13. Programación de la placa	27
14. Costos del proyecto	28
Tabla 1.	28
15. Tiempos de ejecución	29
16. Conclusión	31
17. Agradecimientos	32
18. Referencia Bibliográfica	33

Resumen

En el presente Proyecto Final trabajamos en el diseño, prueba y manufactura de un controlador para una e-bike utilizando la plataforma VESC.

Esta plataforma fue nacida para proveer hardware activamente testeado junto a software. El diseño fue pensado para controlar un motor tipo BLDC presente en una e-bike la cual se comercializa en mercados internacionales. El objetivo de este desarrollo permite obtener mayor potencia sobre el motor BLDC comparándolo con el controlador preexistente.

El nivel de calidad buscado es tal, que se busca cumplir el conjunto de métodos y estándares de diseño compuestos por normas como IPC2221.

Palabras claves: Movilidad sustentable, e-bike, controlador, batería, litio, git, lenguaje C, sistema embebido, hardware, firmware.

1. Introducción

El presente informe tiene como objetivo describir el diseño y tareas realizadas en lo respectivo al trabajo presentado en la Cátedra “Proyecto Final” de la carrera Ingeniería Electrónica de la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Bahía Blanca. Mediante la plataforma VESC¹ se logró partir de un diseño de referencia para la obtención de un controlador de motor BLDC² comercializable y escalable³.

El motor BLDC es de una potencia nominal de 9kW con tres fases presentes en su estator con una tensión nominal de 60 Vca por fase. Su rotor está compuesto por imanes permanentes generando de esta forma sincronización del motor.

El motivo por el cual es llevado a cabo el desarrollo de este controlador es lograr mejoras en cuanto a prestaciones y eficiencia a partir de un producto comercial preexistente. El controlador se encuentra instalado en una e-bike de origen Chino (Figura 1) que se comercializa de forma masiva en mercados globales. Esto último presenta un desafío en cuanto a su diseño, y demás características, por que se está refiriendo a un producto que es adquirido por usuarios de distintas partes del mundo, lo que le da un alto grado de exigencia.

Es por ello que como condición se parte de la necesidad de compatibilidades mecánicas, eléctricas y/o electrónicas respecto al controlador preexistente para que posteriormente, al realizarse los ensayos pertinentes, logre ser comercializado.



Figura 1. Imagen del controlador instalado sobre la e-bike

¹ VESC: sigla de **V**edder **E**lectronic **S**peed **C**ontroller

² Son las siglas de un motor eléctrico de CC sin escobillas (motor BLDC o motor BL, **B**rush**L**ess **D**C electric motor), también conocido como motor conmutado electrónicamente (motor ECM o EC) o motor de CC síncrono, es un motor síncrono que utiliza una fuente de alimentación eléctrica de corriente continua (CC).

³ Se entiende por escalabilidad a la **capacidad de adaptación y respuesta de un sistema con respecto al rendimiento del mismo a medida que aumentan de forma significativa el número de usuarios del mismo**. Aunque parezca un concepto claro, la escalabilidad de un sistema es un aspecto complejo e importante del diseño.

2. Características básicas

El firmware VESC es desarrollado sobre el microcontrolador STM32F405RGT6, el cual cuenta con un procesador de 32 bits trabajando a 84 MHz. El firmware se encuentra escrito integralmente en lenguaje C, compilado con gcc⁴ y desarrollado principalmente por Benjamin Vedder y colaboradores locales tales como el Ingeniero Marcos Chaparro.

El motivo del uso del presente microcontrolador es la particularidad de hardware que presenta en lo referente a la cantidad de generadores PWM utilizados para el control vectorial de la gama de motores soportados por la plataforma.

Este diseño de hardware está orientado al mercado norteamericano, con lo cual, el pcb necesita ser capaz de presentar las siguientes características:

- Controlar un motor del tipo BLDC mediante control vectorial.
- Presentar circuitos en los cuales sus topologías cumplan normas estadounidenses de seguridad.
- Presentar mayor potencia disponible sobre el eje del motor a un precio similar que los competidores, esto se nombra a modo de estrategia de marketing.
- Presentar conectividad Bluetooth para la correspondiente visualización de parámetros en la herramienta VESC Tool.
- Poseer escalabilidad para su producción.
- Compatibilidades mecánicas con el controlador a ser reemplazado en el modelo de e-bike⁵ correspondiente.

⁴ GNU Compiler Collection (GCC) es un compilador de optimización producido por el Proyecto GNU que admite varios lenguajes de programación, arquitecturas de hardware y sistemas operativos. La Free Software Foundation (FSF) distribuye GCC como software libre bajo la Licencia Pública General GNU (GNU GPL).

⁵ una bicicleta que puede funcionar tanto con electricidad como con pedales.

3. *Mercado*

El controlador desarrollado utiliza la plataforma VESC (Vedder Electronic Speed Controller) como referencia de diseño en lo respectivo al hardware y software. Esta plataforma fue desarrollada como proyecto de control de motores por Benjamin Vedder a mediados de 2016. Desde ese momento este proyecto ha crecido de forma exponencial, siendo hoy en día muy utilizado en el mercado mundial de controladores electrónicos de velocidad de motores del tipo BLDC⁶.

⁶ Un motor eléctrico de CC sin escobillas (motor BLDC o motor BL, **brushless DC electric motor**), también conocido como motor conmutado electrónicamente (motor ECM o EC) o motor de CC síncrono, es un motor síncrono que utiliza una fuente de alimentación eléctrica de corriente continua (CC).

4. Infraestructura para el desarrollo

La plataforma VESC es un proyecto para el control de motores, que fue desarrollada por participantes, que de forma remota en distintos puntos del planeta, utilizaron control de versiones basado en Git.

Git es un software de control de versiones pensado en la eficiencia y la confiabilidad del mantenimiento de versiones de aplicaciones, firmware, etc, cuando estás tienen un gran número de archivos de código fuente.

El versionado en Git, sumado a plataformas como github permiten poner los archivos fuentes de cualquier código en desarrollo o desarrollado en la nube. Este desarrollo estará a disposición de cualquier desarrollador interesado en el proyecto. Para copiar e introducir cambios, los desarrolladores utilizan una operación presente en Git denominada fork. Luego de que el responsable del proyecto, evalúe los cambios introducidos, generará un merge (Figura 2). Mediante esta operación se integrarán los cambios a la rama principal del proyecto. Este sistema de trabajo colaborativo es un punto crucial en el desarrollo del proyecto Vesc.

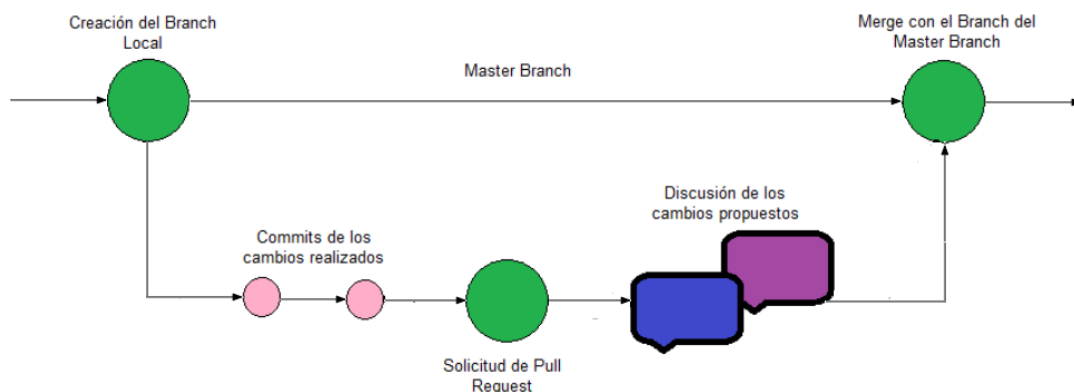


Figura 2. Flowchart

Con respecto al proyecto VESC, es un proyecto totalmente abierto, por lo que obtuvimos los esquemáticos base del proyecto desde el proyecto original, realizando los cambios pertinentes (o necesarios) para satisfacer los requerimientos de potencia.

4. Tipo de Control utilizado en el Controlador.

El concepto de control vectorial determina que la corriente que circula sobre un motor CA puede ser vista como un vector. Este vector rota con una velocidad angular igual a la frecuencia sincrónica de la máquina eléctrica.

Con lo cual la representación vectorial puede ser descompuesta en dos componentes sobre el eje real e imaginario. Las componentes representan el flujo magnético generado en el motor y la otra representa al par generado.

Para la correspondiente procesamiento de las distintas señales presentes se deben utilizar transformadas (Figura 3). Es por esto que en primera instancia, se utiliza la anti transformada de Clarke, en donde se convierten las componentes en el dominio del tiempo de un sistema de tres fases en dos componentes de un marco estacionario ortogonal.

Luego del correspondiente procesamiento de la señal mediante un controlador PID (caso de nuestro controlador) se deberá transformar mediante la anti transformada de Park. Esta convertirá las dos componentes del marco estacionario ortogonal en un marco de referencia ortogonal rotativo. Esto es así para poder controlar de forma eficiente los distintos PWMs de nuestro controlador. Mediante esta anti transformación se facilita la aplicación.

Con esta técnica es posible controlar la velocidad y el torque del motor en todo momento con una alta eficiencia.

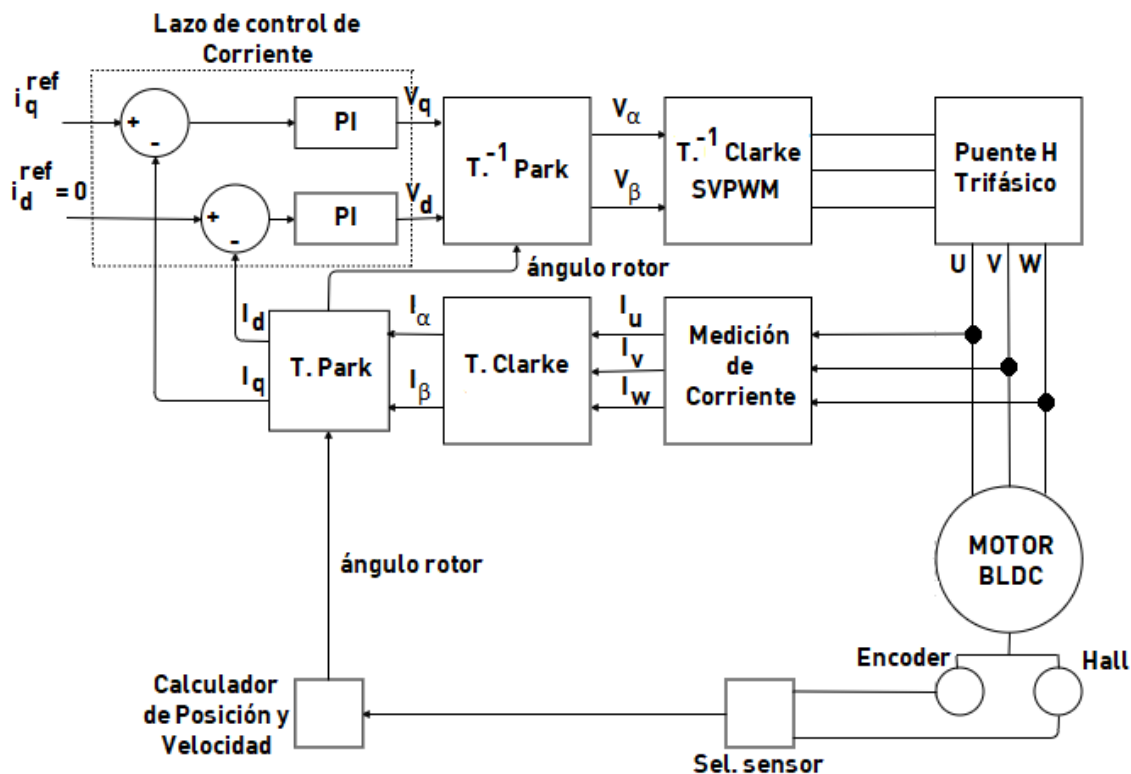


Figura 3. Diagrama general de control vectorial

5. Diagrama en Bloques del Controlador

En la figura 4 se visualiza el diagrama general del controlador. El controlador posee tres bloques centrales, microcontrolador, controladores de compuerta y puente H trifásico.

Para el correcto funcionamiento del control sobre el motor, los bloques centrales hacen uso de bloques acondicionadores de señal. Se acondicionan señales tales como posición angular (acondiciona la señal proveniente de sensores tipo Hall), sensado de voltaje de fase (realiza el escalado de la señal medida además de presentar una barrera eléctrica para el seguro procesamiento de la tensión de fases medidas) y sensado de corriente de fase (realiza como los tres anteriores acondicionamiento de la señal medida sobre un resistor shunt para el posterior procesamiento).

Por último, se visualizan bloques tales como las entradas al sistema (del tipo digital y analógica) y un bloque de protección, compuesto por un comparador (detector de cortocircuito en las fases presentes).

A continuación se detallaran cada uno de los diferentes bloques principales.

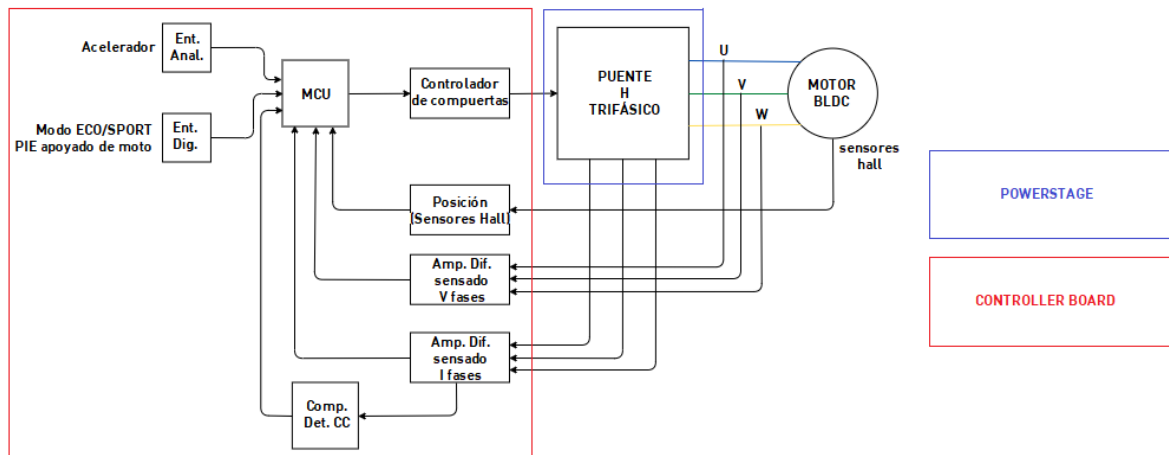


Figura 4. Diagrama en bloques visualizando la forma de control.

5.1 Diseño del esquemático

El software utilizado para el diseño de hardware fue Kicad. Se utilizó este software de diseño de circuitos electrónicos ya que posee licencia de software libre, como las demás herramientas del proyecto. Otra particularidad de este IDE fue la característica de portabilidad que posee, puede ser usado en multiplataformas de sistemas operativos (Linux, MacOS o Windows). Por último, se puede decir que sus formatos estándares son fáciles para el análisis de sintaxis.

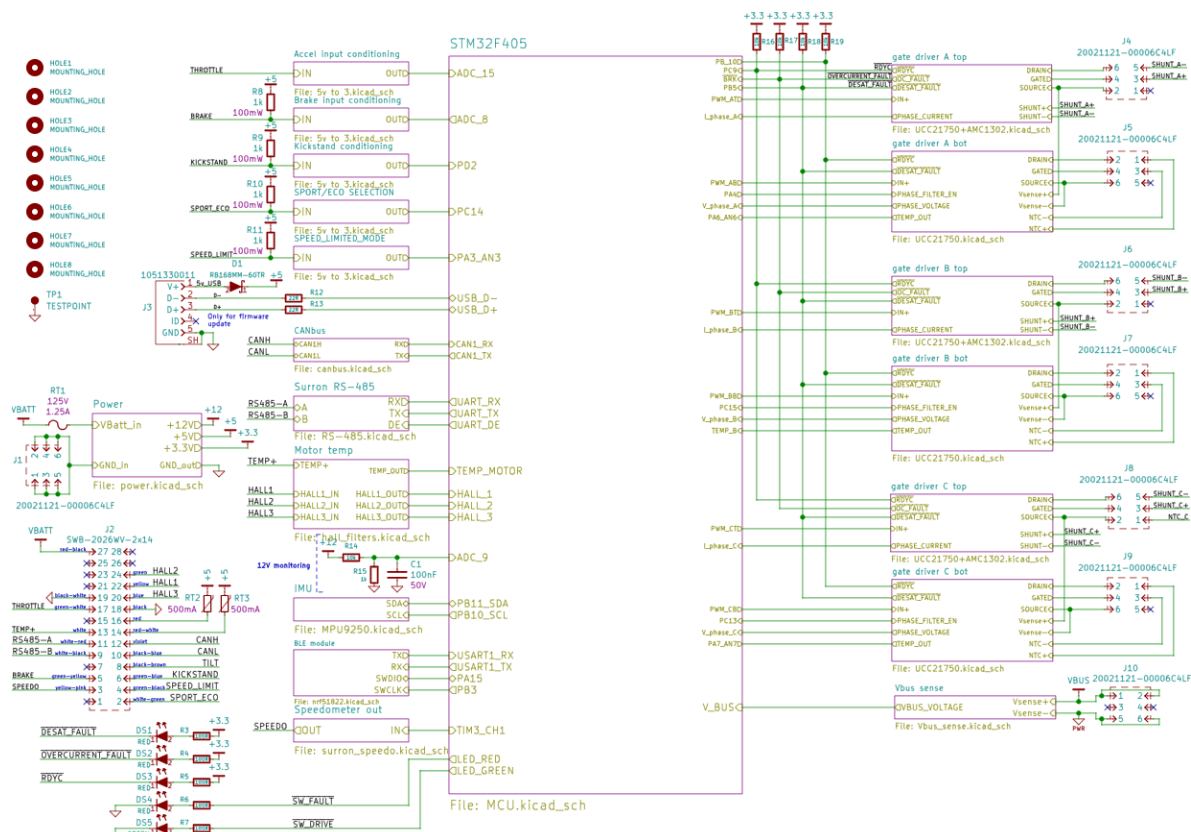


Figura 5. Etapa de Control (Controller board)

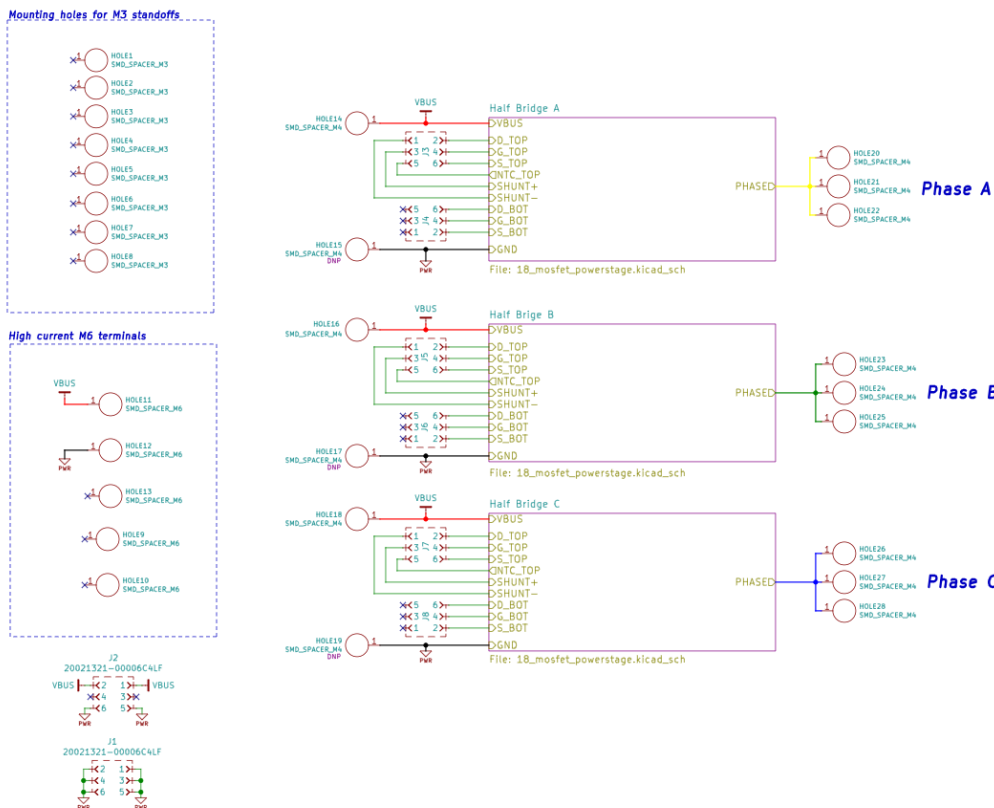


Figura 6. Etapa de Potencia (Power Stage)

Como se observa en las figuras (Figura 5 y Figura 6), la organización de los esquemáticos es del tipo modular. El software presenta este diseño para que cada bloque funcional esté contenido en su propia hoja (sheet). De esta forma, hay una hoja para el microcontrolador, otra hoja correspondiente a los circuitos de regulación de voltaje, controladores de compuerta de mosfets, entradas, etc.

Durante el diseño del diagrama esquemático, se procuró completar cada campo que define a cada componente para poder adquirirlo mediante distribuidores internacionales, tales como Digkey o LCSC. Kicad cuenta con extensiones para autogenerar la lista de materiales, a partir de datos incorporados en el plano esquemático del circuito, de forma que cumpla con el formato del proveedor Digkey, por ejemplo.

Como detalle general, se puede nombrar que en su totalidad el controlador utiliza tecnología de montaje superficial, con el fin de disminuir el tamaño, aumentar la densidad de componentes por cm^2 y fundamentalmente mejorar la resistencia ante el estrés causado por vibraciones.

5.2. Circuito del microcontrolador

El controlador está basado en un sistema embebido. Este sistema embebido es necesario para llevar a cabo el control de torque y de velocidad que se realiza sobre el motor manipulado. Para controlar estas magnitudes se aplica control vectorial. Este tipo de control es el más eficiente hoy en día para el control de esta topología de motores, requiriendo un alto poder de cómputo que provee el microcontrolador utilizado.

El microcontrolador seleccionado es el STM32F405 (Figura 7) cuyas características lo hacen un procesador robusto y aplicable a este proyecto, el cual fue programado en su totalidad desde las plataformas linux para hacer uso de las facilidades que provee el sistema operativo. [Obj]

Sobre este microcontrolador corre el sistema operativo ChibiOS⁷ (versión 3.0.5). El sistema operativo se encarga de gestionar los recursos y procesos necesarios en lo referente a configuración de timers del sistema embebido, atención ante interrupciones externas de los sensores presentes en la moto como también gestionar el puerto usb y la comunicación bluetooth.

En lo respectivo al hardware, podemos visualizar en la Figura 7, las conexiones referentes al cristal externo que provee el pulso de reloj general al sistema (PH0 y PH1). También se puede observar los capacitores C32, C36, C38 y C39 que proveen de filtrado a los pines de alimentación (3.3V) del microcontrolador. Por último, como circuito de filtrado para la tensión de alimentación en lo referido a los conversores ADC-DAC se utiliza un filtro L para la misma alimentación de 3.3V, siendo conformado con E1 y C33/C37 en conjunto. Los demás pines existentes, son utilizados para las distintas tareas llevadas a cabo en el sistema en general por el microcontrolador.

⁷ **ChibiOS / RT** es un sistema operativo en tiempo real compacto y rápido que admite múltiples arquitecturas y se publica bajo una combinación de licencias GPL3 y Apache 2.0 (según el módulo). Está desarrollado por Giovanni Di Sirio.

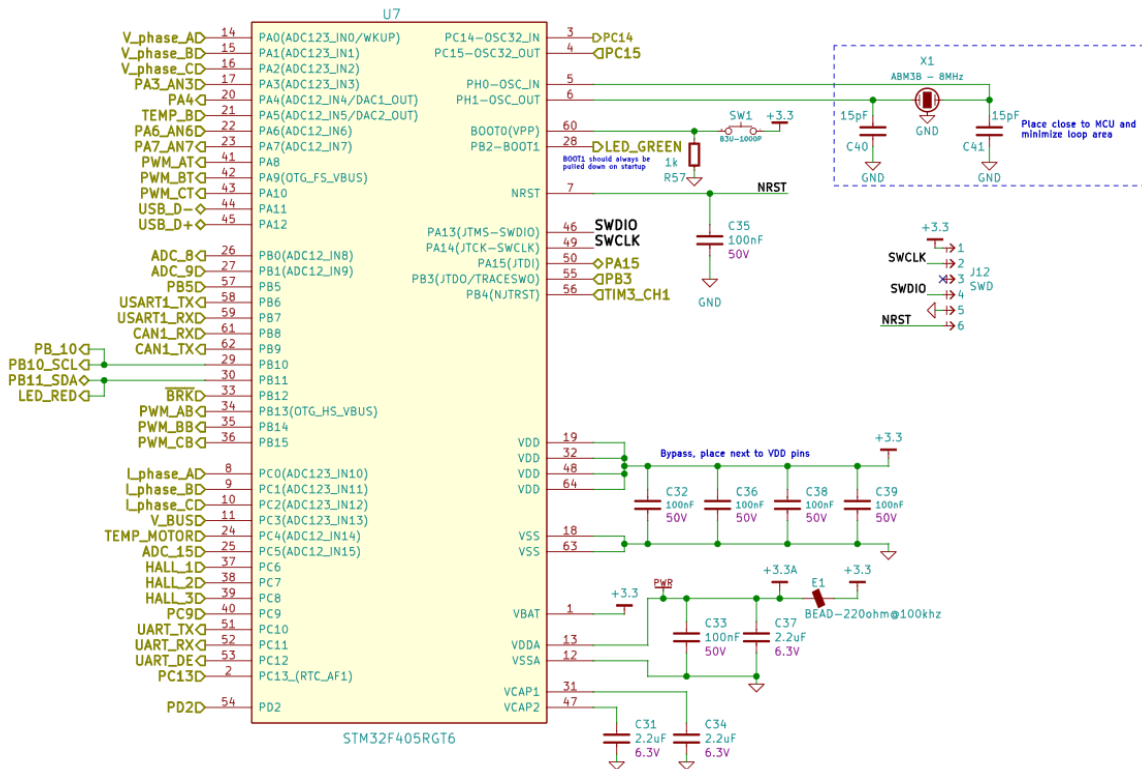


Figura 7. Esquema del Microcontrolador

5.3. Circuito de regulación de tensión de los circuitos.

El controlador se alimenta principalmente de una batería de litio con una configuración 16s4p⁸. La tensión que proporciona esta batería es de 68 Vcc. Por la infactibilidad del uso de esta tensión para los circuitos lógicos y de control es necesario el uso de fuentes tipo SMPS⁹ (Figura 8) para la reducción de esta tensión suministrada.

La elección de estos reguladores (U4, U5 y U6) es la alta eficiencia para la reducción y estabilidad en la tensión de salida para la correspondiente alimentación de los distintos circuitos. Los circuitos hacen uso de tres tensiones principalmente, 15.5Vcc, 5Vcc y por último 3.3Vcc.

Mediante la primera etapa de regulación (conformada por U5) se reduce y controla la tensión a 15.5 Vcc. La topología de este convertidor de tensión es del tipo buck. Este valor de tensión es utilizado para suministrar energía a los circuitos controladores de compuerta de los mosfets de potencia, como también para el circuito de bootstrap. Podemos mencionar como características generales de este convertidor, el suministro de una potencia máxima de 15.5W, es decir 15.5 Vcc con una corriente máxima de 1A.

⁸ 16s4p : 16 celdas en serie y 4 celdas en paralelo en total.

⁹ Switched-Mode Power Supply: topología de convertidores electrónicos que utilizan la conmutación (switching) como la técnica para la reducción o amplificación eficiente de tensión.

El segundo convertidor (U4) posee una tensión de salida de 5 Vcc. Este tiene como fuente de energía el primer convertidor, con lo cual es alimentado con una tensión estable de 15.5 Vcc. Mediante el conexionado en cascada de estos dos reguladores se logra una mayor eficiencia. Además de la eficiencia lograda, existe la imposibilidad de no poder conectar el segundo convertidor directamente a los 68 Vcc de la batería debido a sus características técnicas. Mediante la salida regulada de 5 Vcc se logra alimentar los circuitos de USB, RS485, CanBus, circuito de acondicionamiento de la señal de los sensores hall y el medidor de velocidad.

El tercer regulador (U6) es un regulador del tipo LDO (low-dropout regulator). Este es un regulador de voltaje lineal que puede regular el voltaje de salida cuando el voltaje de alimentación se encuentra muy cercano. En particular este regulador posee a la salida una tensión regulada de 3.3 Vcc. Este regulador suministra energía al microcontrolador como también a los controladores de compuerta de los mosfets de potencia y circuitos de mediciones.

Los 68 Vcc de la batería alimentan al arreglo de MOSFET para posteriormente, mediante el encendido correspondiente, obtener la alimentación de las fases para motor BLDC.

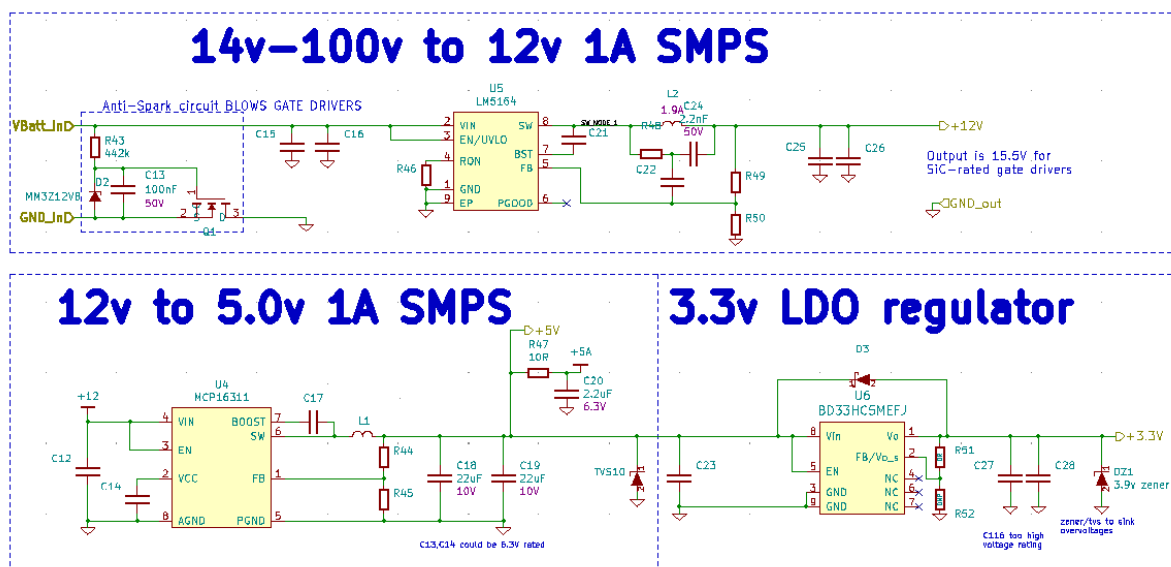


Figura 8. Esquema general de fuentes SMPS

5.4. Modulo controlador de compuertas del puente Half bridge trifásico

Para lograr una mayor eficiencia en cuanto al funcionamiento de los MOSFETs de potencia se emplean controladores de compuerta (Figura 9), más conocidos como gate-drivers. Estos dispositivos hacen que la respuesta de los MOSFET en cuanto a conmutación, sea lo más abrupta posible.

Como se desea usar el MOSFET como interruptor, es decir, que trabaje en la zona de conmutación, es importante evitar la zona lineal porque en esta zona la energía disipada es elevada. Esta energía disipada será equivalente a calor disipado y en un incremento de temperatura que puede dañar al elemento conmutador.

El controlador de compuerta elegido tiene incorporado un detector de saturación como protección del mosfet controlado. El fenómeno de saturación ocurre cuando sobre el MOSFET conmutado circula una corriente superior a la soportada entre los terminales de drenaje y fuente. Es por esto que existe un efecto de estrangulamiento que se representa en una caída de tensión entre los terminales mencionados. Mediante el aumento de esta tensión se logra detectar una elevada circulación de corriente sobre el elemento conmutador, protegiéndolo mediante la detección de un umbral de tensión establecido. El sensado de esta tensión se realiza en el pin DESAT.

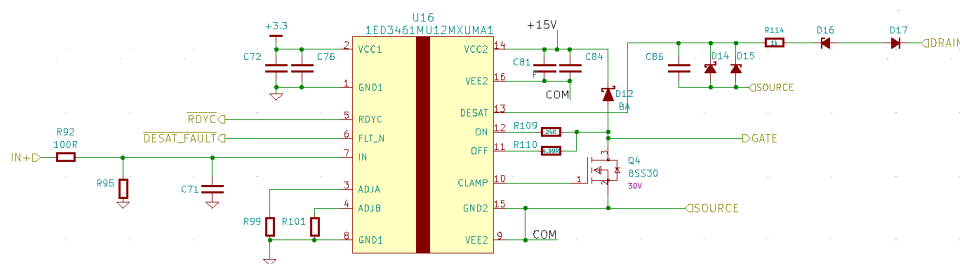


Figura 9. Controlador de compuerta

5.5. Circuito de sensado de corriente de fase

El controlador presenta tres fases como alimentación del motor. Cada fase posee un resistor del tipo shunt en el cual mediante la caída de tensión sobre este, mediremos la corriente circulante de cada fase.

Como lazo de realimentación y medida de protección, se agrega un amplificador aislado (U16/Figura 10) el cual recibe una tensión diferencial proporcional a la intensidad que circula por una resistencia de sensado (SHUNT). Es decir, a cierto valor de corriente circulante en la fase del motor BLDC, se corresponde un valor en tensión el cual es escalado a valores adecuados para el ADC interno del microcontrolador. Es así que se logra establecer las medidas correspondientes de corriente de fase. También se agrega un circuito de protección de sobrecorriente el cual es seteado mediante divisores resistivos.

Por último, podemos visualizar que el conjunto de comparadores U14A y U14B conforman la protección y detección de sobrecorriente. Está protección se encuentra configurada mediante R89, R90 y R91 a un umbral de +/- 900A.

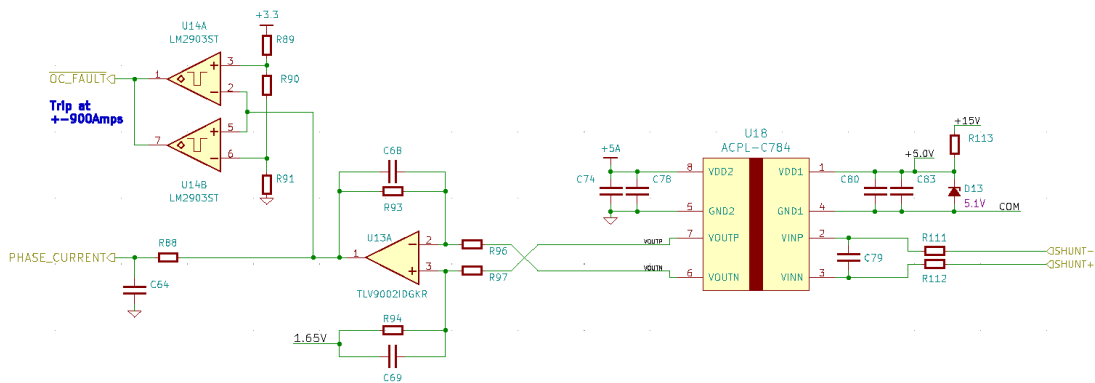


Figura 10. Circuito de sensado de corriente.

5.6. Entradas digitales del sistema

En lo que respecta a los módulos de entrada, estos interactúan con el usuario final (Figura 11). Como entradas digitales relevantes podemos nombrar pie colocado de la e-bike, selector de modo de uso (eco/sport). Para cada señal se establecen circuitos de protección y filtrado para hacerlos adaptables a las capacidades del microcontrolador y no dañarlo. Cómo son señales de control, se respeta el mismo criterio que para las demás entradas.

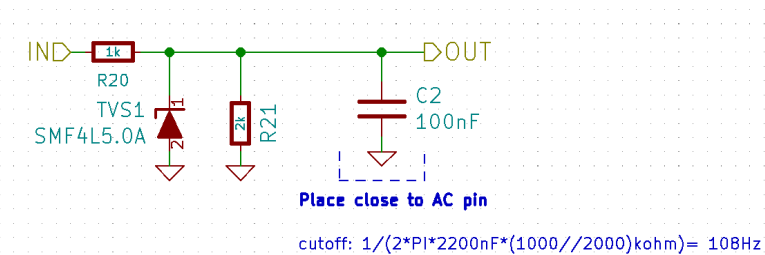


Figura 11. Circuito acondicionador de señal de entradas binarias

5.7. Circuito de sensado de temperatura de MOSFETs de potencia.

Para el sensado de temperatura de los MOSFET de potencia se emplea un amplificador en configuración diferencial (Figura 12). Este toma la variación de tensión que produce un termistor NTC (ubicado en el power stage) en función de la temperatura, la señal producida luego es filtrada y acondicionada para adaptarla a valores soportados por el microcontrolador.

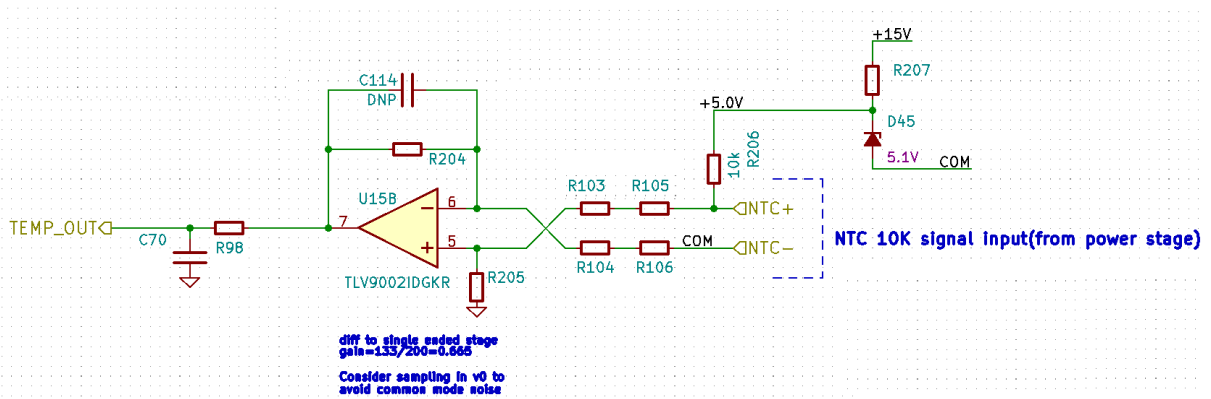


Figura 12. Amplificador diferencial encargado de medir el valor resistivo del termistor NTC.

5.8. Circuito de sensado de tensión de fase

Para la medición de tensión de fase se sigue el mismo criterio de diseño de la Figura 13. Con la salvedad de que difieren en valores de ganancia por cuestiones de magnitudes eléctricas. Este circuito toma la diferencia de tensión en las fases del motor BLDC. Por último por medio de la habilitación de un pin del microcontrolador, y mediante C50 se logra aplicar o no filtrado de tensión de fase.

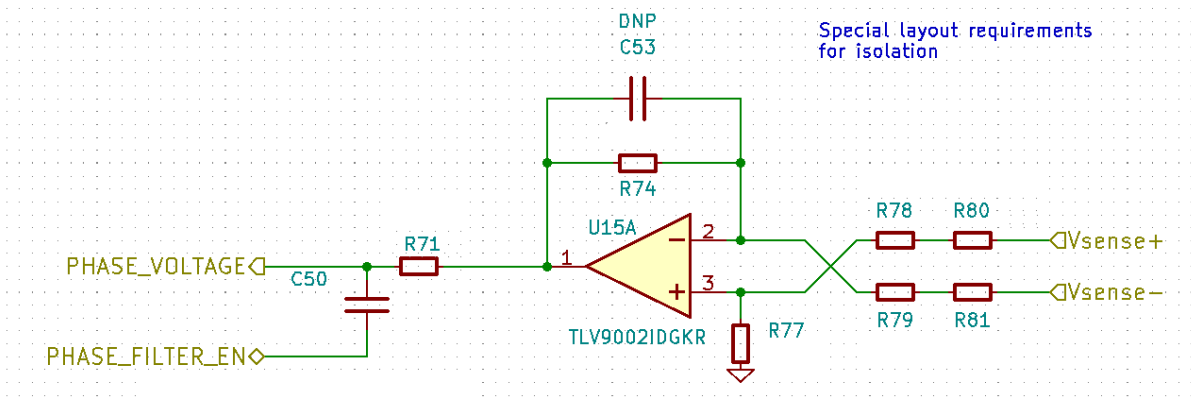


Figura 13. Diff to single ended opamp-VSENSE

5.9. Circuito de puente Half bridge trifásico (Power Stage)

Para esta etapa se hace uso de MOSFETs de potencia en configuración puente como se observa en la Figura 14. Este circuito se encarga de proveer energía al motor de la e-bike permitiendo el movimiento de este mediante la placa controladora (**controller board**) que es la encargada de enviar los pulsos de encendido en función de la demanda del acelerador (throttle setpoint).

Se menciona también que en esta etapa de potencia se encuentran las resistencias shunt para poder medir las corrientes de fase, como así también los termistores NTC para la obtención de temperatura de los MOSFETs.

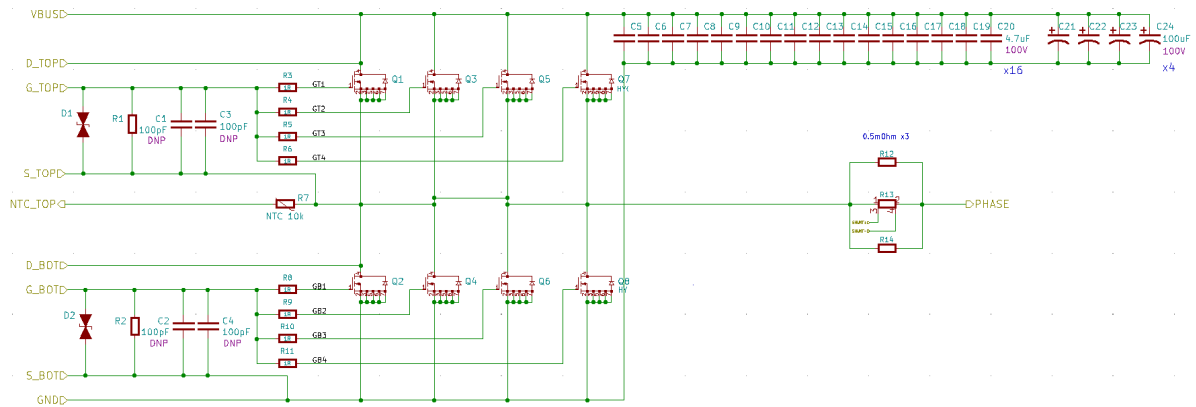


Figura 14. Power Stage

6. Diseño del PCB

Entre las consideraciones básicas de diseño, están las dimensiones del pcb, el espesor del cobre, los métodos para la disipación de calor y las dimensiones mecánicas.

El tamaño de los pcs varían según su función. En el caso de la placa controladora (Figura 15), el tamaño es el adecuado para poder colocar los componentes y además poder realizar el ruteo de estos mismos desde el núcleo de control que es el microcontrolador a los respectivos buffers de potencia.

En lo que respecta a la placa de potencia (Figura 16), posee un tamaño determinado adrede. Este tamaño es acorde a las dimensiones físicas necesarias para poder colocar la cantidad de mosfets requeridos para cada fase teniendo en cuenta también la sujeción de está placa al disipador pertinente.

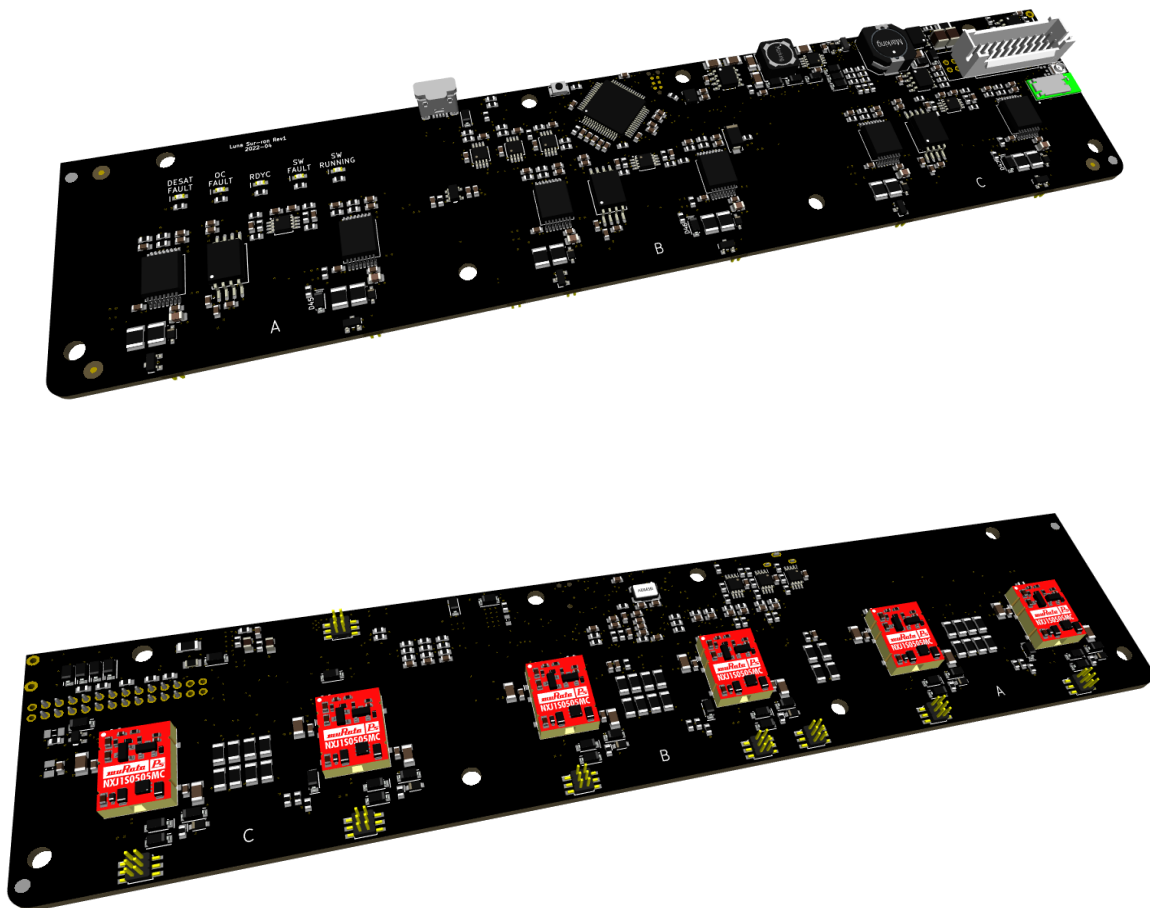


Figura 15. Placa de control (Controller board)

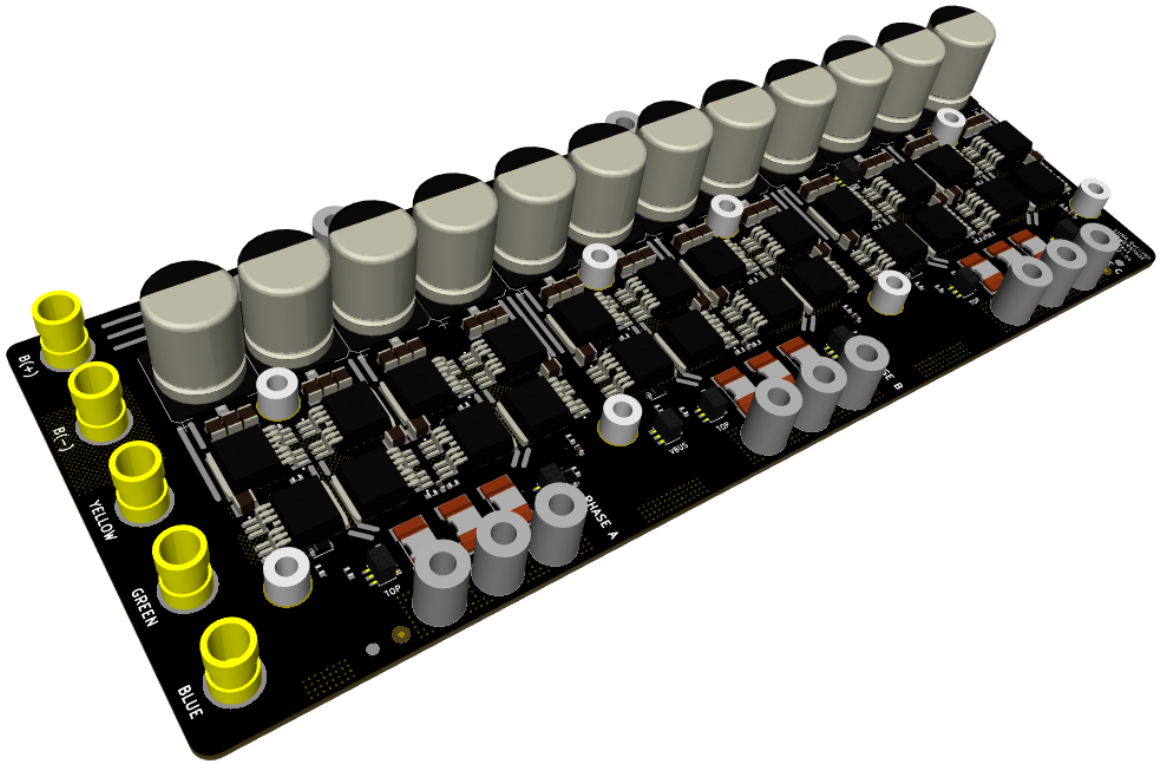


Figura 16. Placa de Potencia(Power stage)

7. Conexionado

Anteriormente se nombró a la placa controladora (Controller Board) y la placa de potencia(Power Stage). Para el correcto funcionamiento, es necesaria la interconexión entre ambas. A la hora de decidir el conexionado entre ellas , se optó por implementar conectores adicionales que permiten una mejor integración. La idea detrás de esto es incorporar toda la complejidad, procesamiento, filtrado, alimentaciones en la placa principal (Controller Board) y así poder integrar con la placa de potencia (Power Stage).

En lo que respecta al conexionado con la e-bike, efectuar la conexión de los sensores que lo componen resulta ser un trabajo tedioso, es por ello que con el agregado de un conector principal permite una instalación fácil,sencilla y rápida (Figura 17).

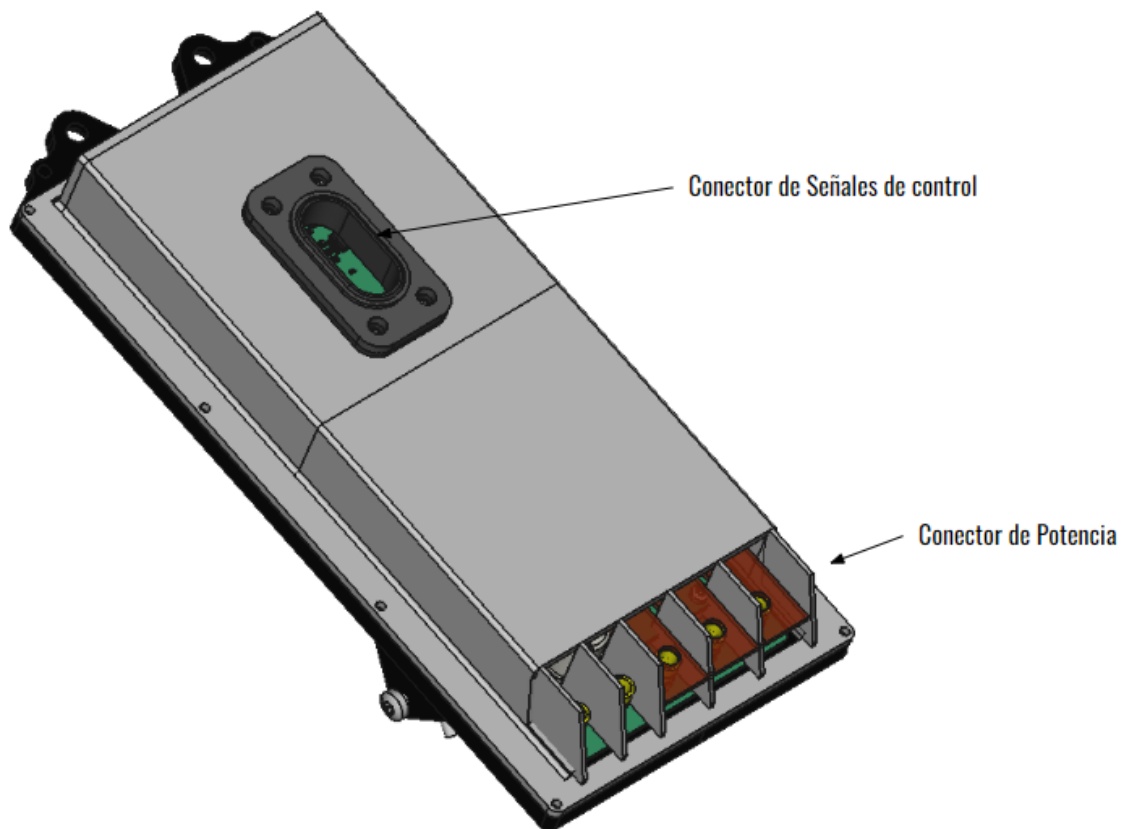


Figura 17. Modelo 3D del controlador con sus respectivas conexiones de potencia y control

8. Tecnología utilizada

La tecnología utilizada para la manufactura del PCB requiere anchos mínimos de tracks 0.2mm, 4 capas y vías de 0.3mm. El material utilizado es FR4, y dado los requerimientos de corriente y temperatura de la placa, el espesor de cobre de cada capa es de 0.035mm (controller board) y el material dieléctrico FR4 que las separa tiene un espesor de 0.48mm. Resultando un espesor total de 1.6mm

La máscara elegida en un principio fue de color negro por motivos estéticos pero también por razones de poder apreciar la aislacion referidas a los gates drivers, ya que estos son aislados, se optó por una máscara color verde (Figura 18).

En cuanto al power stage, se ha implementado 2 capas con espesores de cobre de 0.035mm y espesor de material FR4 de 1.51mm. Esta etapa tiene un diseño especial ya que es la que mayor potencia maneja. En cuanto a la máscara, este se eligió de color negro. Por último la placa de potencia posee una lámina de aluminio como tercer capa que ayuda al pcb en general a tener una menor resistencia térmica a la hora de disipación de temperatura.

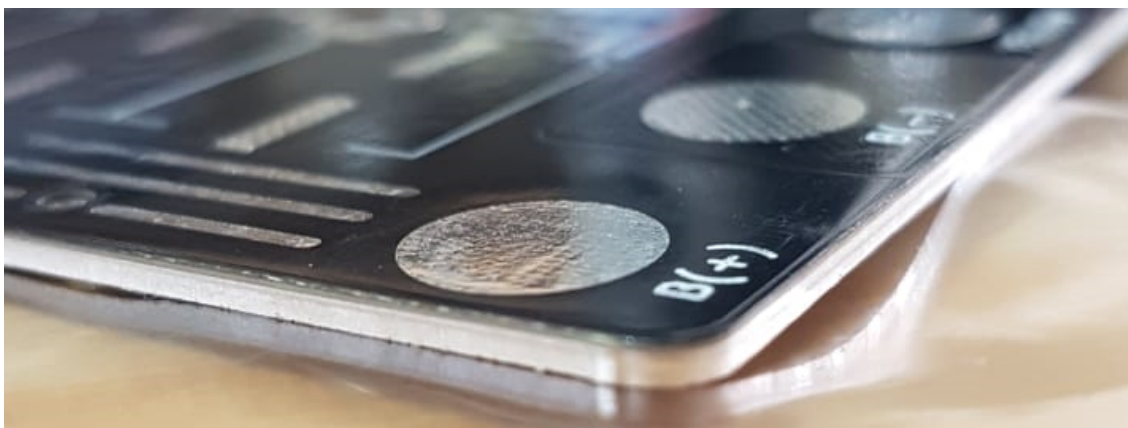
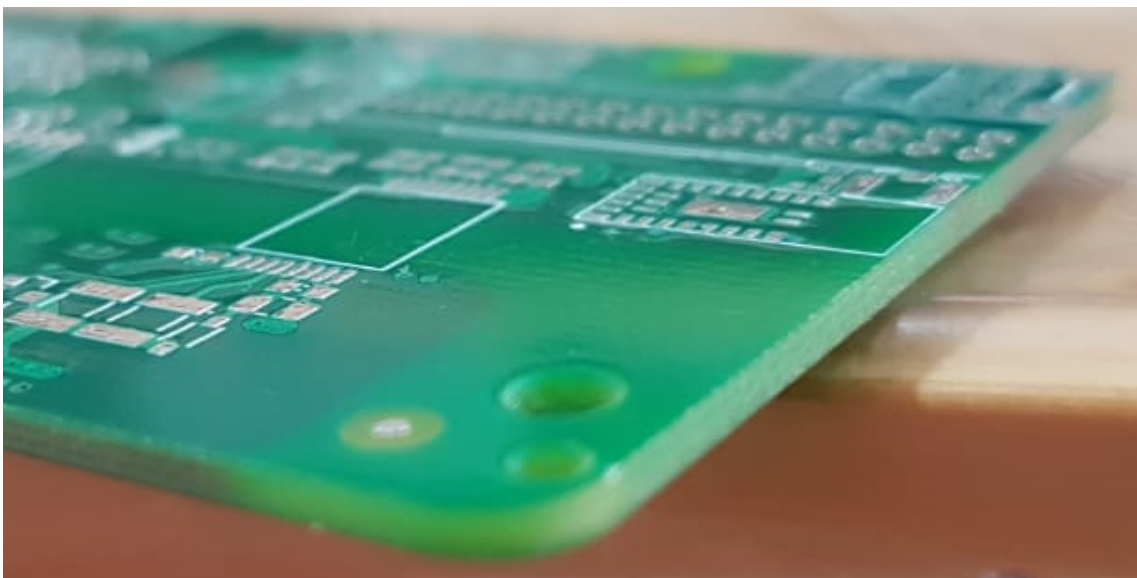


Figura 18. Vista lateral donde se visualiza las distintas capas en ambas placas

9. Criterios de diseño

En cuanto a la placa controladora, una característica importante es el aislamiento entre los circuitos de baja y alta potencia. Esta aislación se logra mediante unos controladores de compuerta aislados galvánicamente, que controlan a los MOSFETs de potencia.

Podemos mencionar que en el diseño se emplean cuatro capas. Esta elección se debe a la complejidad en el ruteo, y al ser un proyecto de gran escala, el uso lo hace más sencillo. A diferencia de una o dos capas, los multicapas requieren una mayor planificación y producción, por lo tanto significa que son de más alta calidad en comparación con otras placas.

Referida a la placa de potencia (Power Stage) para el diseño se emplearon dos capas. Al trabajar a altas potencias se produce una elevada disipación de calor para el PCB, por lo que esta etapa cuenta con un disipador de aluminio como base, para favorecer la conductividad térmica. Al alejar al máximo el calor de los componentes energéticos (MOSFETs), se evitan posibles daños, y se aumenta la capacidad de manejar circuitos de alta densidad con mayores niveles energéticos. Como ya se mencionó, al ser de aluminio ofrece mayor resistencia y durabilidad que los materiales utilizados habitualmente en la fabricación de PCB.

Por último, ambos PCBs cumplen con la norma IPC 2221, la cual establece principios de diseño, recomendaciones, interconexiones y dimensiones en general.

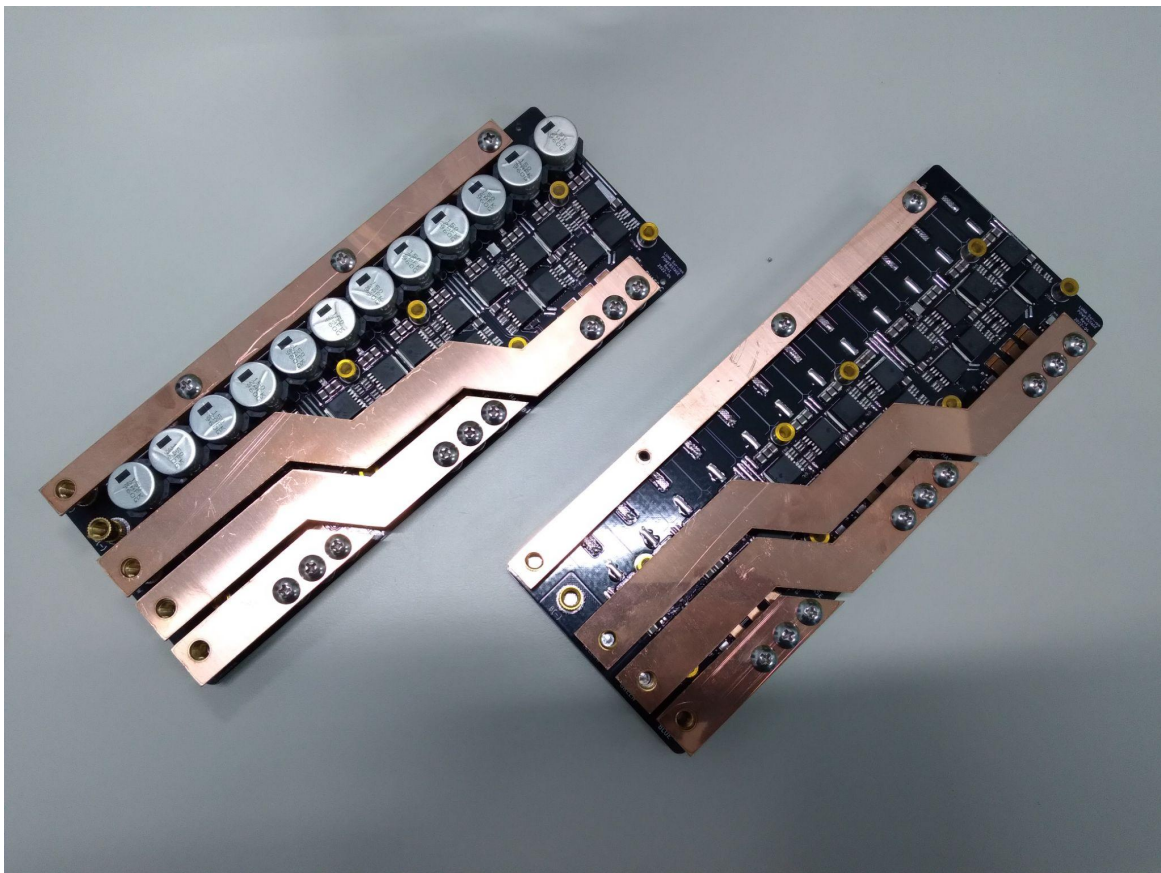


Figura 19. Vista de PCBs soldados

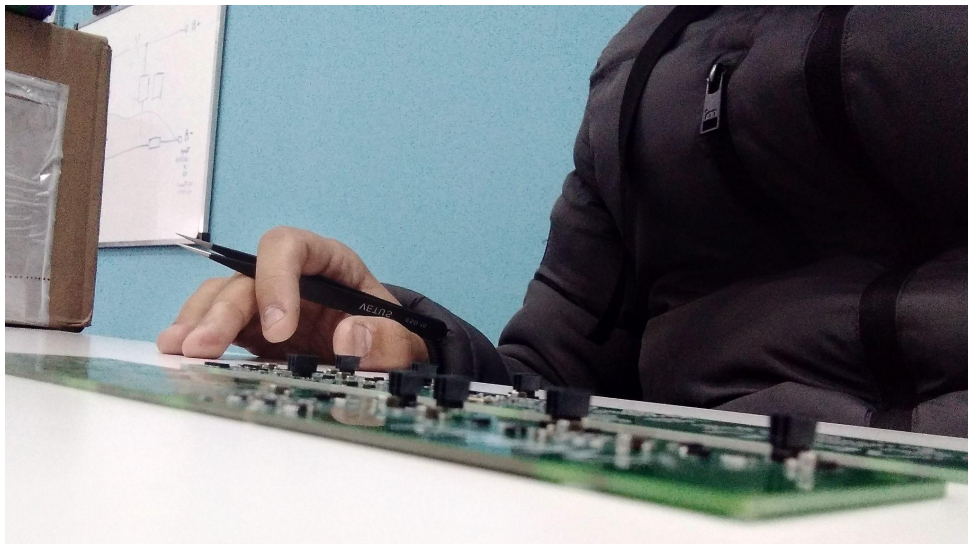
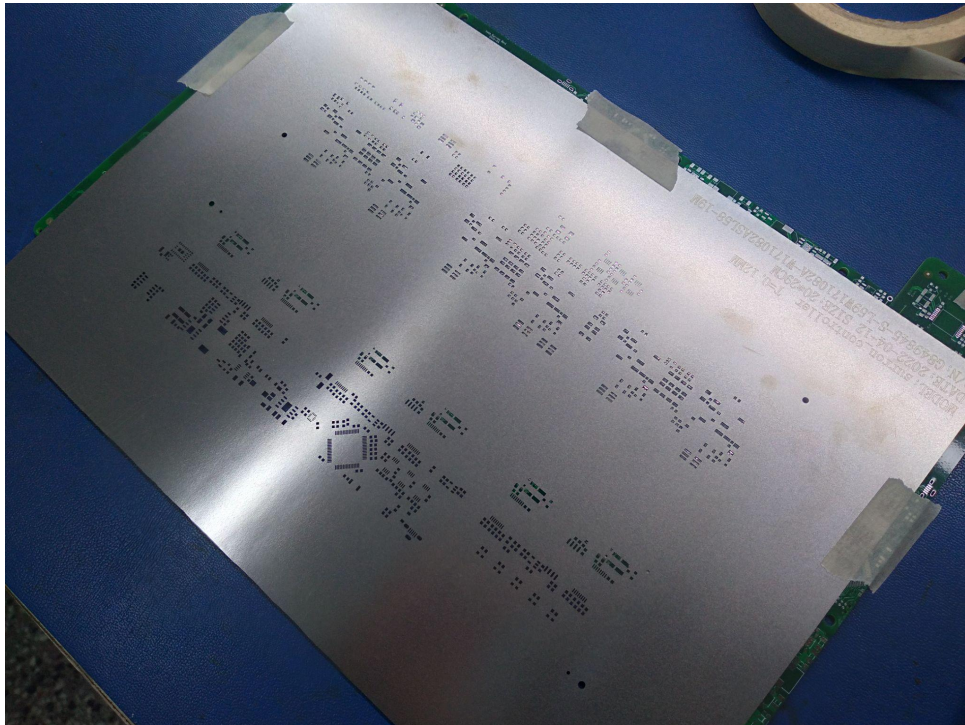
10. Adquisición de componentes

Dado que en el mercado local es prácticamente imposible conseguir componentes específicos y de montaje superficial, todo fue importado desde distribuidores internacionales como Digikey y LCSC. El PCB fue también fabricado en el extranjero e importado al país, por una cuestión de costos, calidad, y tiempo de fabricación. Los componentes fueron elegidos durante el diseño del esquemático, así que éste contiene toda la información acerca del número de pieza y cantidad necesaria para ensamblar una unidad. Esta información fue incorporada en los distintos campos con que cuenta cada componente. En la industria esto es conocido como BOM (Bill of Materials).

11. *Ensamble*

Luego de la adquisición de los componentes y placas se ensambla el primer prototipo a mano, con los elementos correspondientes para realizar las pruebas necesarias. Como Kicad provee datos de todos los archivos de las placas y diseños, a futuro se pretende realizar una producción en serie.

Con respecto al soldado este fue realizado en un horno dedicado a la soldadura de componentes SMD, y el estaño se aplicó en pasta a través de un stencil (Figura 20).



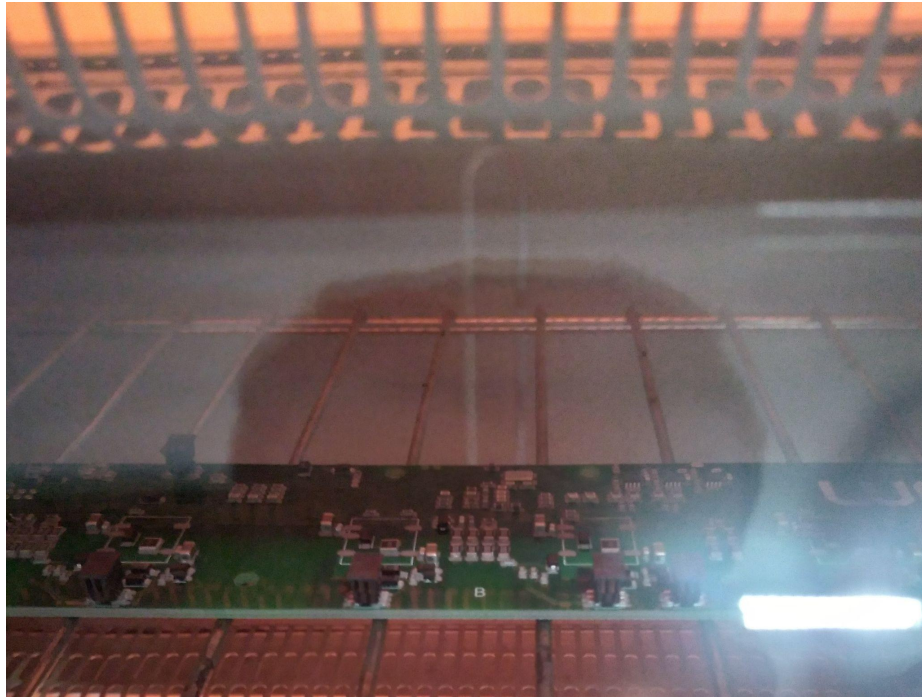


Figura 20. Proceso de ensamblaje de la placa de control (Controller Board)

12. Firmware

El firmware del proyecto VESC es “open source” con lo cual cualquiera usuario o desarrollador puede descargarlo desde su repositorio en Github. En el caso de nuestro firmware presenta algunas variantes que lo hacen único para el controlador desarrollado. Es por esto que nuestro código posee licencia GPL¹⁰, es decir, solo estamos en condición de entregar el código a quienes compren nuestro producto.



<https://github.com/vedderb/bldc>

El README del proyecto es el punto de partida para quienes quieran conocer mejor el firmware:

☰ README.md

VESC firmware

License GPLv3 build passing code quality A contributors 57 watchers 183 stars 1.3k forks 994

An open source motor controller firmware.

This is the source code for the VESC DC/BLDC/FOC controller. Read more at <https://vesc-project.com/>

Supported boards

All of them!

Check the supported boards by typing `make`

¹⁰ La Licencia Pública General de GNU o más conocida por su nombre en inglés GNU General Public License (o simplemente sus siglas en inglés GNU GPL) es una licencia de derecho de autor ampliamente usada en el mundo del software libre y código abierto,⁶ y garantiza a los usuarios finales (personas, organizaciones, compañías) la libertad de usar, estudiar, compartir (copiar) y modificar el software.

El firmware está documentado y es altamente extenso con miles de líneas de código en C.

13. Programación de la placa

La descarga del firmware VESC a la placa se realiza mediante la herramienta VESC Tool (Figura 21). Se conecta a la placa vía USB y luego ingresando en el software se programa como muestra la figura. Su descarga está disponible en https://vesc-project.com/vesc_tool

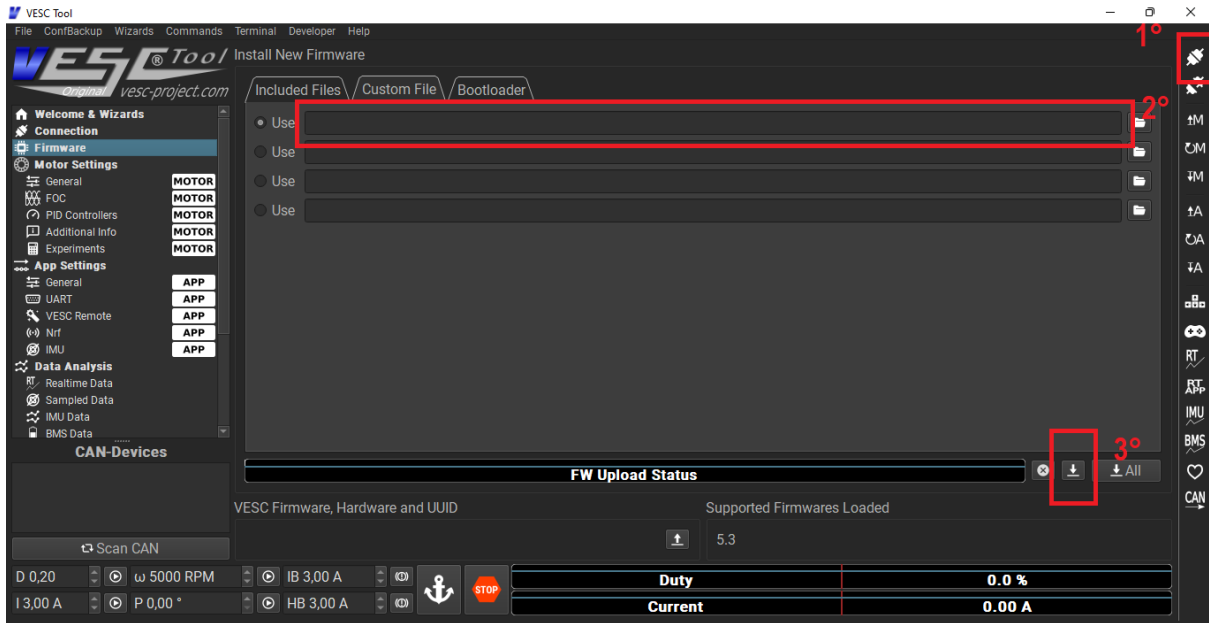


Figura 21. Visualización del programa VESC TOOL con los correspondientes pasos para cargar el firmware al controlador.

14. Costos del proyecto

<i>Item</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Costo unitario (Usd)</i>	<i>Costo extendido (Usd)</i>
<i>BOM (incluido envío)</i>	<i>3</i>	<i>-150</i>	<i>-150</i>
<i>Envío a cliente</i>	<i>1</i>	<i>-80</i>	<i>-80</i>
<i>Horno para soldadura</i>	<i>1</i>	<i>-150</i>	<i>-150</i>
<i>PCBs</i>	<i>15</i>	<i>-12</i>	<i>-180</i>
<i>Pago de cliente</i>	<i>-----</i>	<i>-----</i>	<i>560</i>
<i>Total</i>			<i>0</i>

Tabla 1.

ID	Name	Jun 05, 2022							Jun 12, 2022							Jun 19, 2022							Jun 26, 2022							
		S	S	M	T	W	T	F	S	S	M	T	W	T	F	S	S	M	T	W	T	F	S	S	M	T	W	T	F	S
1	Investigación e inicio																													
2	Busqueda de reemplazos y componentes																													
7	Hardware																													
18	Ensamble y testeo								D																					
23	Double Pulse Test																													E
24	Medicion de parámetros de switcheo de MO...																													E
25	Calibracion circuito medición corriente de fas...																													E
26	Calibracion circuito de temperatura MOSFETS																													E
27	Ensamble y testeo en la moto																													F

16. Conclusión

Sin dudas lo más interesante del proyecto fue el contacto con el mercado internacional y la capacidad productiva que éste posee.

Por ejemplo, el pequeño lote que se construyó de tres controladores fue enviado al cliente internacional con sede en Estados Unidos.

Un punto crítico que se tuvo fue la necesidad de tener que utilizar insumos del exterior para poder cumplir con los estándares y costos necesarios para la producción del presente controlador. Se tuvo que importar desde China los PCB a un precio que el mejor fabricante de placas local no puede competir.

Por último en el proyecto se apreció la esencia del open source, ya que grandes y sostenidas discusiones, ideas novedosas y correcciones valiosas (aportadas por Ingenieros locales como Marcos Chaparro e internacionales) fueron apreciadas, además de lo aprendido en la Universidad. Poder haber realizado el uso del aprendizaje obtenido en nuestra universidad nos dejó una gran satisfacción.

17. Agradecimientos

En principio, queremos agradecer a nuestras familias que nos apoyaron en momentos académicos difíciles con esfuerzo, tiempo y paciencia.

A Marcos Chaparro, por la oportunidad de concretar la articulación universidad-empresa y aportando también toda su experiencia en lo que refiere a Electrónica de Potencia.

A la Universidad Tecnológica Nacional, que nos ha brindado el conocimiento técnico, recurso y contactos para llevar este proyecto adelante.

18. Referencia Bibliográfica

-Dongil Choi, Development of Open-Source Motor Controller-Myongji University, 2018.

https://www.researchgate.net/publication/338588830_Development_of_Open-Source_Motor_Controller_Framework_for_Robotic_Applications