

**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA
VALPARAÍSO - CHILE**



**“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE CONVERTIDORES PARA
ESTABILIZACIÓN DE VOLTAJES EQUIPO SYSMIC ROBOTICS
USM.”**

RICARDO JOSÉ ALFARO BEVILACQUA

**MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
ELECTRÓNICO, MENCIÓN CONTROL E INSTRUMENTACIÓN**

PROFESOR GUÍA: MARCELO PEREZ LEIVA

PROFESOR CORREFERENTE: CESAR SILVA JIMENEZ

MARZO - 2021

AGRADECIMIENTOS

Ha llegado el momento, la hora y el lugar indican que he podido llegar al final de mi primer gran objetivo. Lo que en un principio surgió como una luz de esperanza allá por el año 2013 luego de que mi única hermana, mi compañera de pieza (eramos muchos en la casa), mi apoderada, mi amiga, falleciera a sus 25 años. Estudiar en ese entonces no era prioridad, tomar una decisión para mi vida profesional había pasado a otro plano. Siempre supe que quise estudiar, a muy temprana edad tenía muy claro mis objetivos y la robótica era el objetivo, hacer prótesis robóticas de bajo costo, era el sueño.

El puntaje PSU? un numero que me dejo en la matricula 221 de plan común (electrónica tenía un corte muy alto), una buena excusa para cargar la maleta y decirles a mis padres que quería que me acompañaran a mi primer día de Universidad, de Calama a Valparaíso los pasajes. Como lo recuerdo? los tres sentados en el aula magna escuchando al rector, los tres caminando asombrados por el campus maravillados con la arquitectura y su sinfín de áreas verdes.

De ahí en adelante comienza un largo camino que significó largas noches de trabajo, penas y alegrías. Un camino que me tomó 8 años, que son muy difíciles de resumir, pero que se pudieron disfrutar al máximo. ¿Solo fue estudiar? ojalas, pero no, con el pasar de los años me di cuenta que la Universidad era más que solo estudiar, los BOMBEROS, el buceo, el folclore, trabajar, viajar a ver a mi familia, muchas otras cosas más, pero sin duda, una que marcó y transformó mi pasar por la Universidad, la robótica, aquello que fue mi objetivo inicial, aquello que quise encontrar en cada uno de los ramos que cursé, pero que gracias a un equipo de desconocidos en un inicio, pude encontrar. Si me preguntan ahora, ¿quienes son ellos?, les respondería que se convirtieron en parte de mi familia, un equipo que nos volvimos tan unidos que los objetivos que nos proponíamos, trabajábamos y vivíamos en la U de ser necesario para conseguirlos. Al recordar, es imposible evitar que la nostalgia se haga presente. Son incontable las veces que al preguntarme sobre la U, termine hablando de ellos y cada una de las anécdotas que tuvimos, hasta viajar a Canadá logramos.

Pero no solo fue eso, también pude conocer a muy buenos amigos, algunos por circunstancias de la vida se fueron, pero hay otros que hasta el día de hoy continuamos compartiendo muy buenos momentos.

Quiero dejar estos últimos párrafos para agradecer a mis padres y mi familia. Quisiera partir por mi madre, Nelly Alejandra Bevilacqua Saavedra, la mejor mamá que me ha podido tocar, aquella que cuando me iba mal en una prueba era la primera que llamaba para contarle y esperar esas palabras de consuelo que tanta falta me hacían. Una mujer increíble, quizás le he reprochado muchas cosas, pero nuestra relación se superpone a todo eso. Siempre recuerdo las largas noches de estudio en la básica y media donde ella era mi profesora particular de matemática, siempre me sentí muy afortunado por eso, luego, me tocaba acompañarla para preparar el almuerzo del día siguiente, tome nota de cada una de las comidas que hacía, ahora busco su sabor en cada comida que yo preparo, pero que no puedo encontrar, se me olvido tomar nota del toque especial que le da a todo. Este trabajo y mi título van dedicados para ella, luego de mi hermana, yo sería en 2do profesional de mis hermanos y es el regalo que le quiero dar.

Con el corazón apretado y mis ojos llenos de lágrima, quiero agradecer a mi papá, Charles Harry Alfaro Torres, no alcance llegar a la meta antes que tu partieras, algunas cosas no se dieron para que pudiese compartir este momento contigo, pero se que de donde estés te sentirás orgulloso por todo lo que he podido conseguir. De lunes a viernes, a las 11:15 te llamaba para hablar contigo, para hacer un breve resumen de mi día y contarte lo que hacía. Siempre te interesaste en que yo tuviese todo lo necesario cuando me vine a estudiar, me gustaba contarte lo bien que me había ido en una prueba y recibir "con su deber nomas cumple, hijo" con esa frase sabia lo orgulloso que estabas. El estudiar tan lejos hizo que me perdiera de muchos momentos familiares, incluso cuando tu enfermedad te hizo empeorar, una fibrosis pulmonar era el diagnostico, en Santiago te esperaba la noticia que el tratamiento sería un trasplante, recuerdo la tranquilidad que nos transmitías y que todo saldría bien. 2016 fue el año de la gran noticia, ¡Un donante!, pero quien iba a pensar que en febrero del 2020 la vida nos juntaría en Valparaíso al enterarnos que tu cuerpo había comenzado a rechazar tu pulmón, esa segunda oportunidad de vida que te habían dado se estaba comenzando a agotar. De ahí comienza una época que voy a atesorar hasta mi muerte, nunca había logrado compartir tanto, por tu enfermedad y la pandemia no podías salir de casa, traté de que cada día fuese especial, desde el desayuno de tostadas con mantequilla hasta las cosas ricas (a veces no tanto) que te llevaba para variar los sabores. Si tu me cuidaste, era mi momento para cuidarte y esforzarme por hacer lo mejor posible. La cuenta regresiva nunca se detuvo, tuvimos que dejar todo y viajar urgente a Antofagasta, tu luz se apagaba poco a poco, teníamos que volver. El viaje?... el mejor que hicimos juntos, mas de 14hrs que no quiero olvidar y siempre recordar. Llegó el momento que

seré ingeniero igual que tu, no estoy seguro de poder superar todo lo que conseguiste, pero ten la seguridad que trabajo día a día para conseguirlo. **A mis padres, los amaré por el resto de mi vida.**

No quiero dejar pasar a mi abuelita Nelly Saavedra, ella fue la primera en adueñarse de las llamadas a las 11:15. Revisando entre mis cuadernos encontré aquel primer día clases luego de que te fuiste, si pudiese tomar mi teléfono y llamarte, lo haría y te diría que tu "giro sin tornill" o "el bomberito loco" está terminando, que el final de la meta se acerca y dedicó este triunfo. A mi abuelito Alejandro Bevilacqua, aquel hombre de pocas palabras, pero que confiaba plenamente en cada cosa que yo hacía. Nuestros últimos momentos fueron durmiendo juntos conversando hasta muy tarde a oscuras, pero siempre con tu linterna bajo la almohada. **A mis abuelitos, los amaré y recordaré por el resto de mi vida.**

A mis hermanos, feliz de ser parte de una familia numerosa, 5 hombres y 1 mujer. Forjamos una unidad inseparable, ahora de grandes nos toca recordar nuestras aventuras cuando eramos niños, y afrontar las adversidades que nos han tocado. Es el momentos de ser el apoyo para mi mamita y estar con ella cuando lo necesite. **A mis hermanos, los amaré y compartiré con ustedes por el resto de mi vida.**

A mis primos, primas, tíos y tías, estas palabras van para cada uno de ustedes, que siempre me han apoyado y han confiado en mis capacidades y lo lejos que puedo llegar. Vayan para todos ustedes mis agradecimientos. No quiero nombrarlos para no dejar a nadie fuera, siempre recordare las palabras de aliento cuando me hicieron falta y no olvidaré aquellas palabras de quienes ya partieron. **Para ustedes, los amaré y estaré con ustedes por el resto de mi vida.**

Finalmente, quiero agradecer a Támara López Villalobos, la mujer con la cual he decidido emprender un nuevo rumbo en mi vida, la que se ha convertido en mi pilar para finalizar esta etapa donde los últimos metros, y los mas difíciles emocionalmente, los que superado con ella. **A la mujer que amo, te dedico este logro.**

PD: No quiero dejar nadie fuera, pero es difícil lograr incluirlos a todos, hay personas muy especiales que han dejado huella en mi paso por la U y por estos 26 años que agradezco y también

les dedico este trabajo. Especialmente a Marcelo Pérez, mi profesor guía quien se la ha jugado por materializar este sueño.

RESUMEN

El trabajo desarrollado en este proyecto de memoria de título corresponde al diseño, construcción, y prueba experimental de dos convertidores de voltaje DC-DC empleados en la operación de un robot autónomo. El desarrollo de estos convertidores DC-DC tiene dos objetivos inmediatos: (i) proveer el voltaje de alimentación de 24V necesario para el funcionamiento de toda la plataforma con un rango voltaje de entrada entre 11.1V y 21V proveniente de baterías de litio de 3 hasta 5 celdas de 3.7V nominales; y (ii) Cargar un banco de dos condensadores de 1200 μ F a una tensión de 220V DC encargados de suministrar la energía necesaria al sistema electro-mecánico del robots, denominado pateador.

El convertidor basado en la topología boost permite elevar la tensión de la batería de litio (que puede ser de voltaje nominal entre 11.1V a 21V) a 24V DC energizando la unidad de procesamiento, motores BLDC, unidad de comunicación inalámbrica, sistema de pateo y el dribbler. Como resultado esperado se diseñará e implementará una placa de circuitos impreso (PCB) que permitirá validar el correcto funcionamiento de cada una de los componentes del robot.

El convertidor basado en la topología flyback está dimensionado para convertir el voltaje de entrada de 24V, proveniente del convertidor boost descrito en el párrafo anterior, a 220V y energizar un banco de dos condensadores de 1200 μ F que forma parte del sistema de pateo o kicker del robot. Se diseña y fabrica una placa de circuito impreso (PCB) para validar la simulaciones teóricas del sistema y conseguir que el robot patee la pelota estandarizada por la competencia RoboCup.

El presente documento reporta el análisis, simulaciones, criterios definidos para la selección de componentes, detalles de construcción de cada etapa de conversión de voltaje, caracterización experimental del desempeño de cada circuito en entornos controlados, y la integración de ambos diseños con el resto de componentes del robot.

Palabra clave: Convertidor DC-DC, Flyback, Boost, Pateador, PCB, Dribbler, RoboCup.

ABSTRACT

The work developed in this title memory project corresponds to the design, construction, and experimental testing of two DC-DC voltage converters used in the operation of an autonomous robot. The development of these DC-DC converters has two immediate objectives: (i) to provide the supply voltage of 24V necessary for the operation of the entire platform with an input voltage range between 11.1V and 21V from 3 to 5 cell lithium batteries of 3.7V nominal; and (ii) Charging a bank of two 1200 μ F capacitors at a voltage of 220V DC in charge of supplying the necessary energy to the robot's electro-mechanical system, called the kicker.

The converter based on the boost topology allows raising the voltage of the lithium battery (which can be from a nominal voltage between 11.1V to 21V) to 24V DC energizing the processing unit, BLDC motors, a wireless communication unit, kicking system, and the dribbler. As an expected result, a printed circuit board (PCB) will be designed and implemented that will allow the validate the correct operation of each of the robot's components.

The converter based on the flyback topology is sized to convert the input voltage of 24V, coming from the boost converter described in the previous paragraph, to 220V and energize a bank of two capacitors of 1200 μ F that is part of the kicker system of the robot. A printed circuit board (PCB) is designed and manufactured to validate the theoretical simulations of the system and get the robot to kick the ball standardized by the RoboCup competition.

This document reports the analysis, simulations, criteria defined for the selection of components, construction details of each voltage conversion stage, experimental characterization of the performance of each circuit in controlled environments, and the integration of both designs with the rest of the components. of the robot.

Keyword: DC-DC Converter, Flyback, Boost, Kicker, PCB, Dribbler, RoboCup.

Índice

1. Introducción	7
1.1. Motivación	7
1.1.1. Robot Soccer World Cup ROBOCUP	8
1.1.2. Systemic Robotics USM	10
1.2. Descripción del problema	12
1.3. Alcances y contribuciones	16
1.4. Organización del Informe	17
2. Diseño e implementación convertidor DC-DC Boost	18
2.1. Topología propuesta	18
2.1.1. Estructura y funcionamiento	20
2.2. Diseño de esquemático y simulaciones	22
2.2.1. Diseño de esquemático en WEBENCH POWER DESIGNER	22
2.2.2. Simulaciones en WEBENCH POWER DESIGNER	26
2.3. Diseño de tarjeta de circuito impreso PCB	29
2.4. Montaje y pruebas de funcionamiento	33
2.4.1. Discusión de resultados obtenidos	35
3. Diseño e implementación convertidor DC-DC Flyback	40
3.1. Topología propuesta	41
3.1.1. Estructura y funcionamiento	42
3.2. Diseño de esquemático y simulaciones	44
3.2.1. Diseño de Esquemático	45

3.2.2. Simulaciones en LTspice XVII	46
3.3. Diseño de tarjeta de circuito impreso PCB	48
3.4. Montaje y pruebas de funcionamiento	53
3.4.1. Discusión de resultados obtenidos	55
4. Conclusiones y trabajo futuro	56
4.1. Discusión sobre resultados obtenidos	56
4.2. Trabajo futuro	57
4.2.1. Robots y otras mejoras	57

Índice de figuras

1.1. Diagrama general del funcionamiento de la competencia.	9
1.2. Cancha de fútbol de la división B.	9
1.3. Diseño renderizado robot Sysmic Robotics.	10
1.4. Diseño renderizado robot Sysmic Robotics.	11
1.5. Render pcb principal.	11
1.6. Primer robot de la nueva versión fabricado por Sysmic Robotics.	12
1.7. Diagrama de bloques generalizado del diseño de cada robot.	12
1.8. Diagrama de bloques generalizado de la propuesta inicial del tema de memoria. . .	13
1.9. Conjunto motor y rueda utilizado por el robot para desplazarse.	14
1.10. Composición del sistema del dribbler utilizado para el control de la pelota.	15
1.11. Baterías LiPo diferentes voltajes, capacidad de corriente y tamaños.	15
1.12. Solenoide del sistema de pateo alimentado por el banco de condensadores.	16
2.1. Esquema generalizado convertidor DC-DC boost.	19
2.2. Estados de operación del convertidor según el estado del interruptor.	20
2.3. Formas de onda en estado estacionario en modo de operación continua.	21
2.4. Relación no lineal dependiente del porcentaje del tiempo en que el interruptor está encendido.	21
2.5. Herramienta de diseño WEBENCH de Texas Instrument	23
2.6. Referencia de diseño del LM3478 WEBENCH	24
2.7. Referencia de diseño del LM5156H WEBENCH	24
2.8. Esquemático del LM3478 que se implementará.	25
2.9. Voltaje V_{out} y corriente de salida I_{out} del convertidor boost.	26

2.10. Comportamiento del voltaje de salida V_{out} cuando es encendido el convertidor. . .	27
2.11. Comportamiento del voltaje de salida V_{out} cuando se aplica un escalón en el voltaje de entrada V_{in}	28
2.12. Comportamiento del voltaje de salida V_{out} cuando se aplica un escalón de la corriente de salida I_{out}	29
2.13. Componentes de la librería en Altium Designer.	30
2.14. Esquemático boost en software Altium Designer.	31
2.15. Distribucion recomendada por Texas Instrument.	32
2.16. Diseño PCB boost en software Altium Designer.	32
2.17. Render PCB boost en software Altium Designer.	33
2.18. Fabricante Chino de tarjetas de circuito, PCBway.	34
2.19. PCB del convertidor boost fabricada.	35
2.20. Bateria de litio LiPo de 6 celdas y 22.2V 1500mAh 75C	36
2.21. Resistencia interna.	36
2.22. Consumo de corriente en pruebas controladas.	37
2.23. Caracterización de funcionamiento según corriente consumida.	38
3.1. Diagrama de bloques generalizado de la propuesta inicial del tema de memoria. . .	40
3.2. Esquema generalizado convertidor DC-DC flyback.	41
3.3. Estados de operación del convertidor según el estado del interruptor.	42
3.4. Formas de onda del funcionamiento del convertidor flyback.	44
3.5. Versión previa del pateador basado en la topología boost.	45
3.6. Typical application especificada en la hoja de datos del fabricante.	46
3.7. Esquemático utilizado en las simulaciones en LTspice	47
3.8. V_{out} : Voltaje del banco de condensadores.	48
3.9. V_{out} : Voltaje del banco de condensadores al simular la descarga en el solenoide. . .	48
3.10. Componentes de la librería en Altium Designer.	49
3.11. Diseño esquemático flyback en software Altium Designer.	50
3.12. Diseño PCB driver de pateo en software Altium Designer.	51
3.13. Distribución recomendada por Linear Technology.	51
3.14. Diseño PCB flyback en software Altium Designer.	52

3.15. Render PCB flyback en software Altium Designer.	53
3.16. PCB del convertidor flyback fabricada.	54

Índice de tablas

2.1. Potencia consumida y corriente promedio consumida por la PCB, motores y dribbler. 38

Capítulo 1

Introducción

El trabajo desarrollado en esta memoria de título consiste en el diseño, implementación, y caracterización de dos convertidores de voltaje DC-DC utilizados para el funcionamiento de un robot perteneciente al equipo Sysmic Robotics USM. Este trabajo corresponde a una primera etapa de un proyecto más amplio, el cual apunta a lograr en el mediano plazo un sistema integrado capaz de adecuarse a los requerimientos eléctricos y dimensiones físicas del robot; en el largo plazo se espera desarrollar un equipo de robots autónomos capaces de jugar un partido de fútbol sin la intervención humana. El desarrollo de estos convertidores apunta a la validación experimental asociada a las pruebas de funcionamiento en vacío y fuera del robot, para luego realizar pruebas experimentales montando cada convertidor en el robot.

Este capítulo presenta una breve reseña del planteamiento del problema general de diseñar cada convertidor, contextualizar el funcionamiento de cada robot y exponer el rol de Sysmic Robotics USM en el mundial de robótica ROBOCUP. Posteriormente, se plantean los principales objetivos, alcances y restricciones del trabajo realizado, y un resumen de la organización del informe.

1.1. Motivación

En los últimos años ha habido un acelerado desarrollo de nuevas tecnologías en el ámbito de la ingeniería en computación y electrónica. Por ejemplo, la elevada capacidad de procesamiento y la reducción de costo de las plataformas computacionales para procesamiento paralelo ha facilitado

el acceso a tecnología que resultaba prohibitiva hace unos años atrás, lo cual ha permitido el resurgimiento y perfeccionamiento de las llamadas técnicas de *inteligencia artificial* [1] y algoritmos avanzados de control automático. Por otro lado, el uso de cámaras de alta velocidad y resolución en distintas aplicaciones se ha hecho cada vez más cotidiano, dando paso al creciente desarrollo del tópico de *visión computacional* [2]. Estos avances tecnológicos ofrecen grandes oportunidades para el desarrollo de plataformas orientadas a la docencia experimental y complementar cursos clásicos con experiencias demostrativas.

1.1.1. Robot Soccer World Cup ROBOCUP

La Robot Soccer World Cup RoboCup es una iniciativa científica internacional con el objetivo de promover el estado del arte de los robots inteligentes. Cuando se estableció en 1997, la misión original era presentar un equipo de robots capaces de ganar contra los campeones de la Copa del Mundo de fútbol humano para 2050.

La competencia se desarrolla año a año en diferentes partes del mundo desde su fundación en el año 1997. La meta de la competencia es que, gracias al desarrollo, innovación, e investigación ejecutados por sus participantes, un equipo de robots pueda competir contra los campeones de la FIFA en el año 2050. Lo anterior es una motivación para el desarrollo y tiempo que le dedican los competidores, donde el premio para el equipo ganador consiste en el reconocimiento mundial. Este año, producto de la contingencia, la competencia se realizará de forma on-line poniendo a prueba la capacidad de cada equipo participante.

Las reglas que rigen la competencia, establecen que los partidos de fútbol robótico estarán conformado por dos equipos de 11 robots en la categoría A (participan los equipos más experimentados) y 6 robots para los equipos que participan en la categoría B. Cada robot no puede exceder los 180mm de diámetro y los 150mm de altura, la distribución interna es propietaria de cada equipo siempre y cuando no supere las dimensiones indicadas.

Cada partido de la división B se lleva a cabo en una cancha de 9m x 6 m(ver figura 1.2) y sobre ella se ubican 4 cámaras encargadas de recolectar y procesar las imágenes con la finalidad de obtener la posición y orientación de cada robot. Luego, cada equipo procesa la información proveniente de las cámaras comunicándole a cada robots cuales serán las instrucciones de movimiento. En la figura 1.1 se ejemplifica el funcionamiento de un partido de fútbol, cabe destacar que no hay intervención humana en el desarrollo de cada partido.

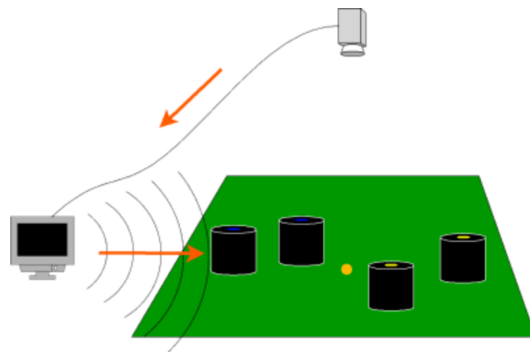


Figura 1.1: Diagrama general del funcionamiento de la competencia.



Figura 1.2: Cancha de fútbol de la división B.

1.1.2. Sysmic Robotics USM

Sysmic Robotics USM es un equipo multidisciplinario de estudiantes de la Universidad Técnica Federico Santa María de Casa Central y Sede Viña del Mar, cuyo objetivo es crear robots autónomos que puedan jugar partidos de fútbol contra equipos de diferentes países. Esto a través de complejos diseños mecánicos, electrónicos e inteligencia artificial, motivando a nuevas generaciones a interesarse, innovar y participar en la aventura de llevar nuestra tecnología a representar a Chile en una competencia mundial Robot Soccer World Cup.

Es relevante destacar el funcionamiento y desempeño de Sysmic al tratarse de un equipo de estudiantes auto-gestionado que ha logrado desarrollar e integrar tecnologías de talla mundial. En la figura 1.3 se muestra el diseño en 3D que cumple con las dimensiones especificadas por la organización de la competencia. Cada robot posee un patrón de colores que le permiten a la cámara individualizar a cada robot en el campo de juego.

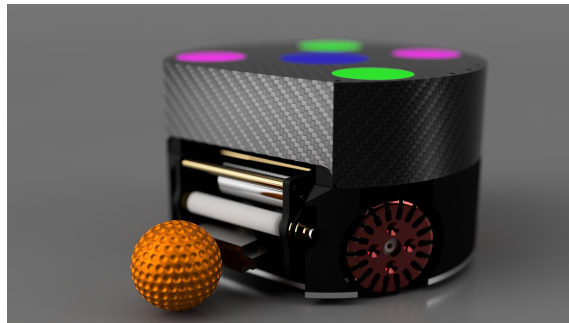


Figura 1.3: Diseño renderizado robot Sysmic Robotics.

En la figura 1.4 se muestra el robot sin la carcasa y deja a la vista parte de la distribución interna de cada uno de los componentes que conforman cada robots.

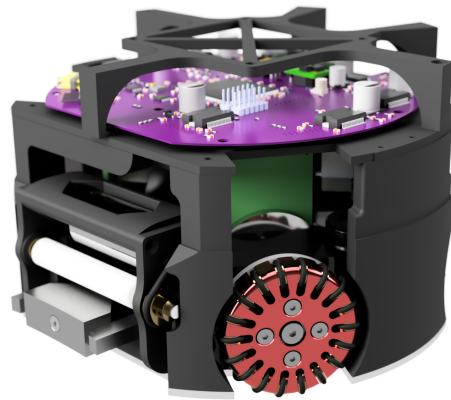


Figura 1.4: Diseño renderizado robot Sysmic Robotics.

Un trabajo realmente destacable es el diseño de la placa de control del robot donde se integran los drivers para cada una de las ruedas del robot, el módulo de comunicación inalámbrica, el microcontrolador STM32 como unidad de procesamiento. Este diseño fue llevado a cabo por uno de los integrantes del equipo, la PCB se fabricó en China y el montaje queda a cargo el área de hardware de Sysmic.

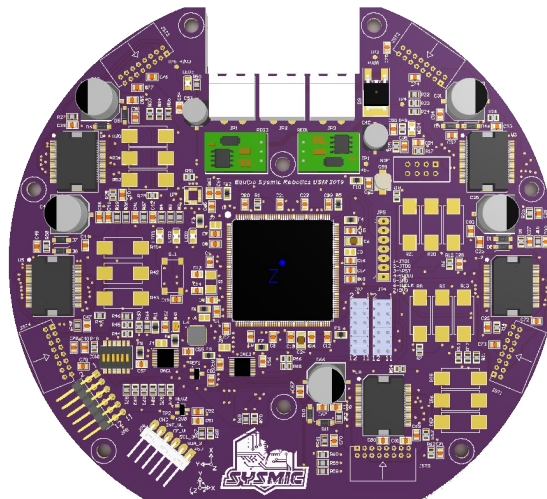


Figura 1.5: Render pcb principal.

Finalmente, en la figura 1.6 se muestra el primer prototipo del robot fabricado a partir de los diseños 3D. Cabe destacar que en este trabajo se expone el desarrollo la última versión del robot,

pero Sysmic cuenta con dos diseños previos y uno de ellos corresponde al utilizado en el mundial del año 2018.

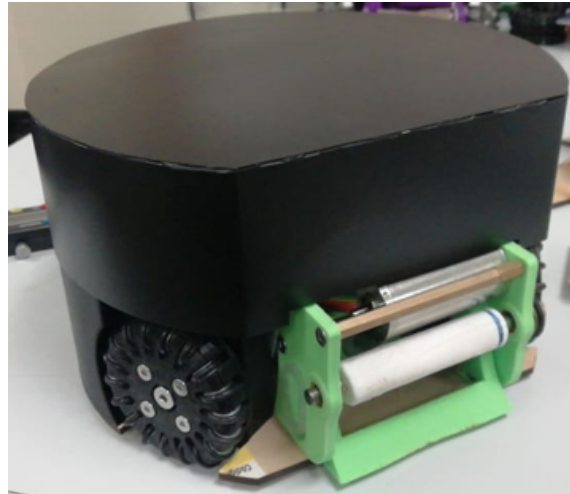


Figura 1.6: Primer robot de la nueva versión fabricado por Sysmic Robotics.

1.2. Descripción del problema

Este trabajo de memoria propone un cambio a la estructura que compone cada uno de los robot del equipo Sysmic Robotics. Cada robot de la generación del 2018 se podría resumir en los componentes que se aprecian en la figura 1.7. En aquel año, posterior a la competencia, se identificaron dos problemáticas que afectaron el desempeño del equipo.

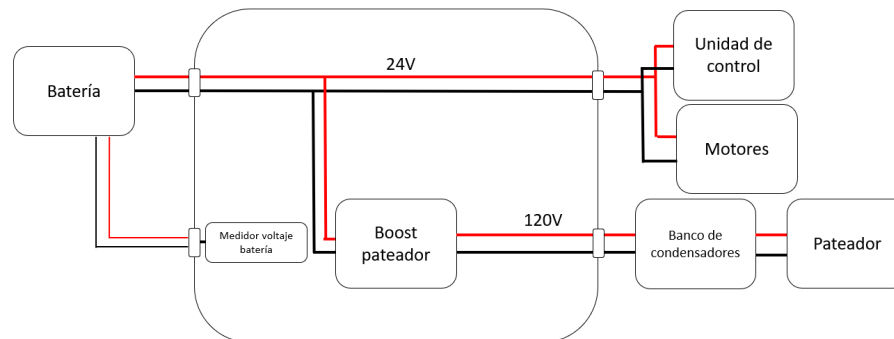


Figura 1.7: Diagrama de bloques generalizado del diseño de cada robot.

La primera problemática se relaciona con el tamaño de la batería y su ubicación al interior de cada robot que obligaba a desarmar la mitad del robot para poder realizar el cambio por otra, y la segunda problemática tenía relación con el tiempo de carga del banco de condensadores (superior a 4s) y el nivel de tensión al que se cargaba.

Este trabajo propone una estructura propuesta en la figura 3.1, se incluyen dos etapas de conversión de tensión, el primero será un convertidor boost que permitirá utilizar una batería de menor tamaño que evitará los problemas de disponibilidad de espacio interior, sin comprometer el voltaje con el que funciona cada robot y luego, se incluye un cambio en la topología del convertidor del sistema de pateo por un flyback para conseguir un menor tiempo de carga y un mayor nivel de tensión de salida.

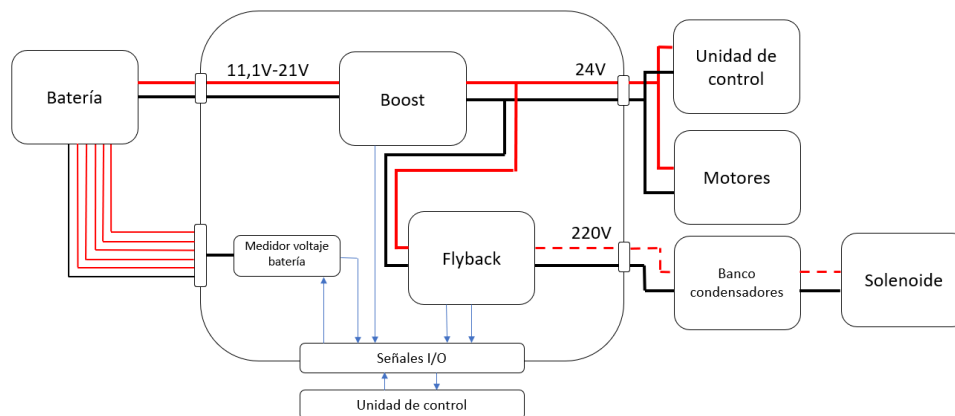
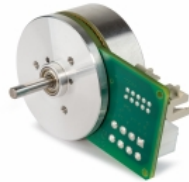


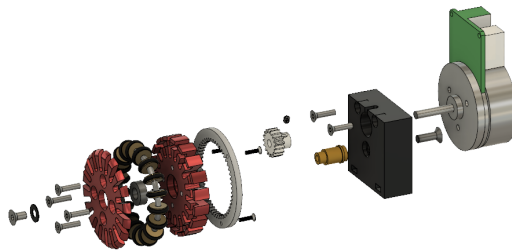
Figura 1.8: Diagrama de bloques generalizado de la propuesta inicial del tema de memoria.

Se diseñará e implementará un sistema de conversión de voltaje DC que alimentará al robot con 24V a partir de un rango de tensión de entrada entre 11.1V hasta 21V provenientes de una batería de litio, este módulo permitiría probar una mayor variedad de baterías al interior del robot. Desde el punto de vista teórico, se logra una alta eficiencia de conversión de voltaje, una robustez de cada componente, facilidad de montaje y fiabilidad en el desempeño dado que todos los sistemas del robot dependerán de esta arquitectura. En la presente memoria se trabajará a partir del funcionamiento de la versión actual del robot que no cuenta con un convertidor de voltaje y utiliza una batería LiPo de 6S de 22.2V (25.2V estando completamente cargada), esperando igualar el

funcionamiento para baterías de menor voltajes que se encuentre dentro del rango de tensión permitido, y poder escoger la batería que ocupe el menor espacio posible y cumpla con la capacidad de energía requerida.



(a) Motor BLDC

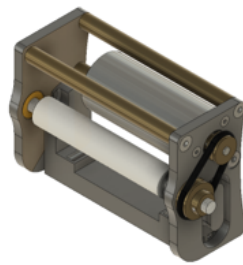


(b) arreglo de motor/bloque/rueda

Figura 1.9: Conjunto motor y rueda utilizado por el robot para desplazarse.

Los motores a los que el convertidor boost les deberá suministrar energía aparecen en la figura 1.9a los que a su vez conforman el tren motriz de cada robot como aparece en la 1.9b, el otro motor utilizado es el dribbler de la figura 1.10, mecanismo que permite manejar la pelota durante los desplazamientos del robot.

Analizando una de las problemáticas de la versión antigua robot(con la batería 6S) tiene relación con la disponibilidad de espacio interior para los distintos elementos que lo componen, por lo que se llega a la conclusión de incluir una etapa de conversión de voltaje, el convertidor permitiría utilizar una batería de menor tensión pero que cumpla con almacenar la energía suficiente para hacer funcionar el robot durante medio tiempo de un partido, entendiendo que a menor voltaje el tamaño de la batería disminuye considerablemente, disminuir voltaje significa reducir la cantidad de celdas en serie.



(a) Sistema del dribbler



(b) Motor utilizado en el accionamiento

Figura 1.10: Composición del sistema del dribbler utilizado para el control de la pelota.



Figura 1.11: Baterías LiPo diferentes voltajes, capacidad de corriente y tamaños.

El segundo convertidor que aborda en esta memoria tiene relación con el diseño e implementación de un convertidor flyback, el cual se encarga de alimentar un banco de condensadores que trabajan de forma combinada con un solenoide que es el pateador del robot como aparece en la figura 3.1. Desde el punto de vista técnico, se requiere que los tiempos de carga de 24V a 220V se realice en menos de 0.5s, se debe incluir un interruptor que permita descargar los condensadores al recibir la señal de "pateo" desde la unidad de control, robustez en su funcionamiento dado el alto voltaje y que las dimensiones de la placa de circuito se ajusten a las limitaciones de espacio del robot.

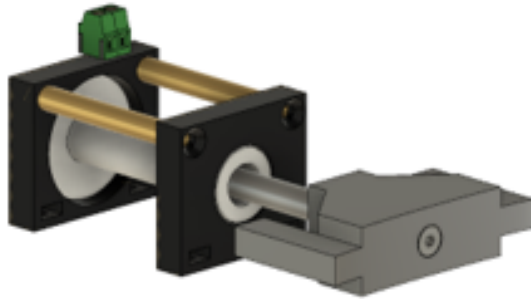


Figura 1.12: Solenoide del sistema de pateo alimentado por el banco de condensadores.

Como punto de comparación del convertidor flyback, se cuenta con la plataforma utilizada en el mundial de robótica de Montreal 2018, Canadá, que consta de un convertidor boost que realiza la carga del mismo banco de condensadores a un voltaje de 120V en un tiempo aproximado de 7s, siendo este último la principal razón de mejora dado que para efectos de un partido de fútbol es un tiempo excesivo que se espera reducir.

Finalmente, se realizarán las pruebas pertinentes para caracterizar y evaluar el desempeño de cada convertidor comprobando si son capaces de cumplir con los requisitos de diseños y las exigencias del funcionamiento del robot. Algunos parámetros experimentales a determinar incluyen la rapidez con la que se carga el banco de condensadores, la estabilidad del voltaje de salida del boost y la caracterización de la corriente que consume, determinar la batería físicamente mas pequeña (que se encuentre dentro del rango de voltaje especificado). Para esto, se definen y desarrollan una serie de pruebas sistemáticas que permitirán a futuro identificar las fallas y así evaluar que el robot funcione adecuadamente, o incluso, poder determinar si es necesario probar topologías distintas a las que se proponen para resolver las problemáticas detalladas anteriormente.

1.3. Alcances y contribuciones

Los convertidores descritos en este trabajo se enfocan exclusivamente en validar cada uno por separado y será un trabajo futuro el lograr un diseño que integre ambos convertidores en una sola placa de circuito. Debido a que el robot fue previamente diseñado por el equipo Sysmic Robotics

para funcionar con 24V es que el boost debe tener el mismo nivel de tensión de salida, y el flyback debe usar la misma tensión como la tensión de entrada.

Finalmente, este trabajo desarrolla el diseño, implementación y pruebas de circuitos que no están pensados en la integración inmediata en los robots, sino mas bien como una etapa de validación permitiendo probar que cada uno de los convertidores funcione y que se pueda igualar el funcionamiento del robot de referencia.

1.4. Organización del Informe

El resto de este informe está estructurado como sigue:

- El **Capítulo 2** describe el diseño e implementación del convertidor boost, abordando el porqué se utilizó esta topología, detallando el diseño, selección de cada componente, simulaciones y describiendo en extenso el diseño y montaje de la placa de circuitos para finalizar con las pruebas de funcionamiento.
- El **Capítulo 3** describe el diseño e implementación del convertidor flyback, abordando el porqué se seleccionó esta topología, detallando el diseño, selección de cada componente, las simulaciones y describiendo en extenso el diseño y montaje de la placa de circuitos para finalizar con las pruebas de funcionamiento.
- El **Capítulo 4** resume las principales conclusiones obtenidas del trabajo realizado y se discuten los resultados obtenidos. De igual manera, se plantea el trabajo a realizar a continuación de esta memoria de título con el fin de dar continuidad al mejoramiento del funcionamiento del robot.

Capítulo 2

Diseño e implementación convertidor DC-DC Boost

En esta sección se describen los criterios de selección, el diseño del esquemático, diseño de la placa de circuitos, pruebas de funcionamiento y el análisis de los resultados obtenidos. Un resultado esperado del capítulo es validar el funcionamiento de esta topología que en un etapa posterior, será implementado en de acuerdo a las necesidades de espacio de cada robot del equipo Sysmic Robotics.

2.1. Topología propuesta

Los convertidores DC-DC se usan extensamente en sistemas de suministro de energía DC encontrándolos al interior de diversos equipos como por ejemplo, celulares, televisores, equipos de audio y una muy larga lista. La eficiencia alcanzada por este tipo de convertidores es una de las características más destacables, la reducida cantidad de componentes y la posibilidad de miniaturización son otras características que resaltan.

Como su nombre lo indica, los convertidores DC-DC se caracterizan por convertir la energía DC de la entrada en otro nivel de energía DC, particularmente para este capítulo, se hablará del convertidor boost, que como su nombre lo indica, es un circuito elevador de tensión. Un convertidor boost se caracteriza por tener un nivel de tensión a la salida siempre mayor que el nivel de

tensión de entrada.

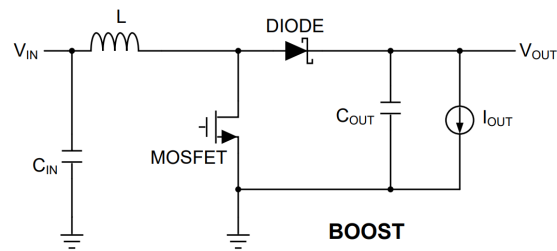


Figura 2.1: Esquema generalizado convertidor DC-DC boost.

El equipo Sysmic Robotics plantea la problemática de espacio que tiene con cada uno de sus robots e identifican a la batería de litio (LiPo) como unos de elementos que se podrían optimizar (en capacidad y tamaño físico) para conseguir más espacio disponible. Es por lo anterior que se propone una etapa de conversión de voltaje que permita adecuar el nivel de tensión de la batería al nivel requerido por el robot. Particularmente se sugiere utilizar un convertidor DC-DC boost por las siguientes razones:

- Eficiencia: Se puede conseguir topologías con un gran porcentaje de eficiencia, logrando aprovechar al máximo la nueva batería seleccionada.
- Cantidad de componentes: El número de componentes electrónicos necesarios para poder implementar es reducido como se muestra en la figura 2.1.
- Espacio: Al ser requeridos una cantidad reducida de componentes, se puede lograr una miniaturización de la placa de circuitos.
- Razón de conversión: El voltaje que se desea obtener a la salida en el peor de los casos será el doble del voltaje de entrada (12V a 24V), pudiendo ser manejado perfectamente por esta topología.

Finalmente, la solución propuesta será un convertidor boost que tendrá un rango de voltaje de entrada de una batería de 3S ($3 * 3,7V = 11,1V$) y una batería 5S ($5 * 3,7V = 18,5V$) con un voltaje de salida de 24V con una corriente estimada de 5A.

2.1.1. Estructura y funcionamiento

La figura 2.1 corresponde al esquema generalizado de un convertidor boot. Se observa que el circuito se compone de un inductor, un interruptor semiconductor, un diodo y un condensador de salida. Un dato interesante es que con estos mismos componentes se pueden crear otras topologías de convertidores DC-DC como es el buck o reductor.

Dependiendo del estado en el que se encuentra el transistor (comúnmente un MOSFET) se desprenden dos posibles estado de operación representados en la figura 2.2

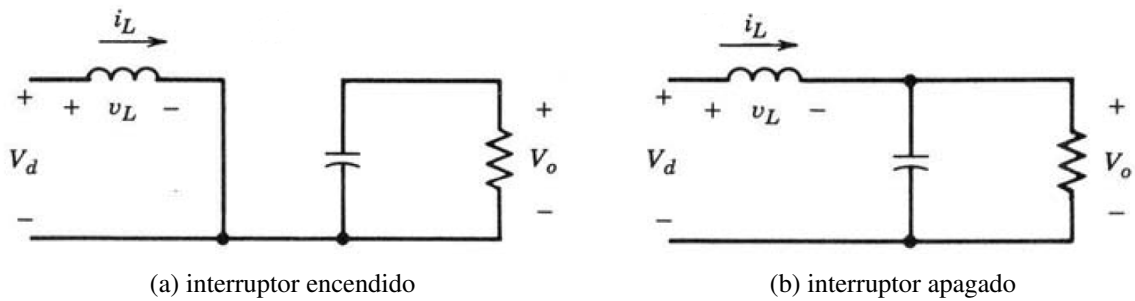


Figura 2.2: Estados de operación del convertidor según el estado del interruptor.

El primer estado de operación está representado en la figura 2.2a donde el interruptor se encuentra encendido. El diodo es polarizado de forma inversa lo que provoca que la etapa de salida este aislada de la entrada, como consecuencia, la energía es almacenada en el núcleo magnético del inductor. El otro estado de operación es cuando el interruptor se encuentra apagado, ver figura 2.2b, la energía de la entrada y el inductor fluyen a la etapa de salida.

Para poder obtener una expresión del voltaje de salida V_o en función de las variables del sistema se analizará el comportamiento de la corriente y voltaje del inductor para los dos estados posibles:

- interruptor on: $v_L = V_d = L \frac{di_L}{dt} \implies (\Delta i_L)_{off} = \frac{V_d DT}{L}$
- interruptor off: $v_L = V_d - V_o = L \frac{di_L}{dt} \implies (\Delta i_L)_{on} = \frac{(V_d - V_o)(1-D)T}{L}$

Al tratarse de un análisis con componentes ideales, se concluye que $(\Delta i_L)_{off} + (\Delta i_L)_{on} = 0$, de esta ecuación podemos obtener la relación que hay entre el voltaje de entrada y el voltaje de salida en función del ciclo de trabajo.

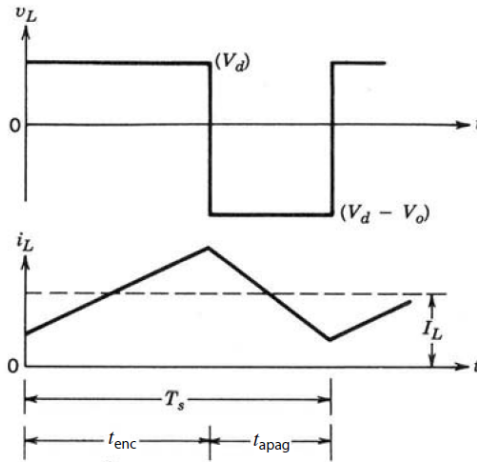


Figura 2.3: Formas de onda en estado estacionario en modo de operación continua.

Reemplazando obtenemos lo siguiente:

$$\frac{V_d D T}{L} + \frac{(V_d - V_o)(1 - D) T}{L} = 0$$

finalmente,

$$V_o = \frac{V_d}{1 - D}$$

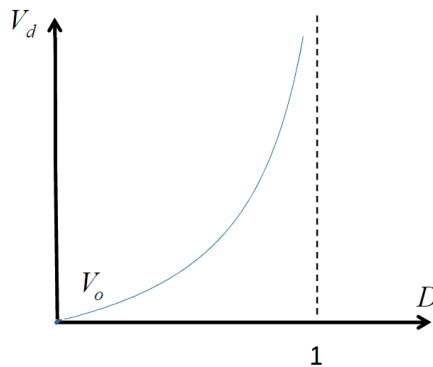


Figura 2.4: Relación no lineal dependiente del porcentaje del tiempo en que el interruptor está encendido.

2.2. Diseño de esquemático y simulaciones

De la experiencia y observaciones realizadas en la competencia mundial de la Robocup realizada el año 2018 en la ciudad de Montreal, Canadá el equipo Sysmic Robotics comienza a observar las complicaciones en el diseño y los problemas que genera el tamaño de la batería cada vez que era necesario reemplazarla por una nueva. Además, se observó que muchos equipos de categorías superiores utilizaban baterías que estaban dimensionadas para una mitad del partido de fútbol consiguiendo reducir el tamaño sin la necesidad de agregar una etapa de conversión de voltaje, pero se cree que la solución sugerida con el convertidor boost sería una mejora adicional al conseguir reducir aun más el tamaño físico de la batería. Se hace especial mención a las dimensiones físicas de la batería, pero no se debe descuidar la capacidad de almacenar energía que también influye en las dimensiones, básicamente hay que llegar al equilibrio entre tamaño y la capacidad de corriente. El voltaje no sería un factor decisivo dado que el boost se encarga de fijar el nivel de voltaje requerido por el robot.

En este trabajo se busca validar el funcionamiento del convertidor, que en un futuro se integrará en conjunto con el convertidor flyback (que se desarrollara en el siguiente capítulo) en una única tarjeta de circuito. Esta nueva placa se sumaría a la ya existente encargada de realizar todas las labores de control y funcionamiento del robot (como se muestra en la figura 1.5).

2.2.1. Diseño de esquemático en WEBENCH POWER DESIGNER

El equipo Sysmic Robotics tiene experiencia en la implementación de un convertidor boost, en el mundial de robótica fue esta la arquitectura encargada de cargar el banco de condensadores que conforman el sistema de pateo, pese a lo anterior, hay un gran obstáculo para volver a usar este convertidor debido a la forma en como se llevaba a cabo la conmutación del semiconductor. El convertidor boost estaba compuesto por un ATMEL328P que en ocasiones provocaba una saturación del inductor a causa de las fluctuaciones repentinas en la conmutación del mosfet, generando un sobrecalentamiento que dañaba a todo el circuito.

Es por lo anterior que para esta nueva etapa de conversión se desea emplear un circuito integrado especialmente diseñado para el manejo de convertidores DC-DC, de esta forma se asegura

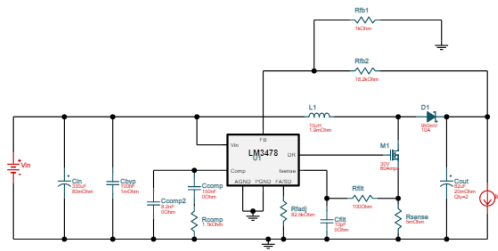
que el lazo de control para ajustar el voltaje de salida siempre funcione de forma óptima. Es en esta búsqueda en la que se encuentra la herramienta WEBENCH POWER DESIGNER propietaria de Texas Instrument, esta herramienta se especializa en el diseño de convertidores de potencia DC-DC y AC-DC permitiendo encontrar el circuito integrado que se ajusta a los requerimientos de diseño. En la figura 2.5 se aprecia el interfaz de usuario donde se indican los requerimientos de diseño como el rango de voltaje de entrada, voltaje de salida, corriente de salida, tipo de entrada, entre otras características. Cabe destacar que el software solo provee arquitecturas de Texas Instrument.

The screenshot shows the 'Create a new DC/DC power design' interface. It includes a search bar for 'Part Number', an 'Input' section with 'Supply type is' set to 'DC', and input fields for 'Vin Min *' (11.1 V) and 'Vin Max *' (21 V). The 'Output' section shows 'Vout *' (24 V) and 'Iout Max *' (5 A), with an 'Isolated Output' toggle. A 'Design Consideration' section offers options like 'Balanced', 'Low Cost', 'High Efficiency', and 'Small Footprint'. A 'VIEW DESIGNS' button is at the bottom.

Figura 2.5: Herramienta de diseño **WEBENCH** de Texas Instrument

Una vez ingresado los parámetros, WEBENCH arroja variadas alternativas en la que la corriente de salida se transforma en el factor decisivo a la hora de elegir algún diseño sugerido. Dado el nivel de corriente impuesto se comienzan a descartar todas aquellas alternativas que no son capaces de manejar la cantidad de corriente, esto es a causa de que el circuito integrado tiene incorporado un mosfet que maneja niveles de corrientes inferiores. Para poder subsanar esta problemática, se buscan aquellas topologías que cuentan con un mosfet externo para manejar la corriente de salida.

En las figuras 2.6 y 2.7 se observan algunas de las alternativas sugeridas, un detalle interesante de cada circuito es que se entregan algunos datos para poder hacer una comparación entre los distintos circuitos integrados.



LM3478

Compare ⋮

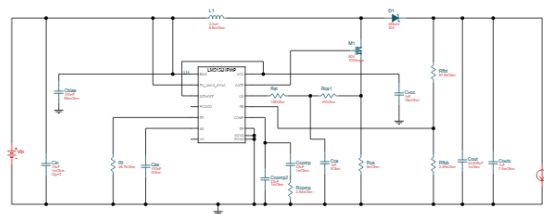
2.97-40V Wide Input Range Boost/SEPIC/Flyback DC-DC Controller

Efficiency: 95.3% BOM Cost: \$5.11 Footprint: 1235 mm²

BOM Count: 17 Topology: Boost Frequency: 222.19 kHz

IC Cost: \$0.73 | 1ku

Figura 2.6: Referencia de diseño del LM3478 WEBENCH.



LM5156H

Compare ⋮

2.2-MHz wide VIN nonsynchronous boost, flyback, & SEPIC controller with dual random spread spectrum

Efficiency: 95.8% BOM Cost: NA Footprint: NA BOM Count: 21

Topology: Boost Frequency: 444.71 kHz IC Cost: \$0.73 | 1ku

Figura 2.7: Referencia de diseño del LM5156H WEBENCH.

Con la información disponible se puede comenzar a realizar los primeros filtros hasta determinar el circuito a implementar.

- Eficiencia

- Cantidad de componentes
- Costo del BOM
- Simplicidad del circuito

El trabajo de selección del circuito a utilizar se centró en la disponibilidad de cada uno de los componentes de la lista de materiales y el costo que es decisivo para el equipo Sysmic Robotics dado que es un equipo auto-financiado que cualquier reducción en costos es significativa. La lista de componentes del LM3478 es de aproximadamente 5.11USD y para el LM5156 un aproximado de 7.26USD, en la figura 2.7 aparece NA a causa de un condensador que se debe seleccionar. Se utilizó el valor del componente más costoso para estimar el valor total de la lista. Cada valor se debe multiplicar al menos por 5 para tener una cantidad razonable de intentos para validar el diseño, además, se deben sumar los costos de transporte e internación al ser compras realizadas en el extranjero y finalmente sumar los costos de fabricación de la tarjeta de circuito en China. Pareciera ser una diferencia marginal entre el LM3478 y el LM5156 pero en términos de costos totales, la alternativa a desarrollar será el LM3478.

Finalmente, el esquemático será:

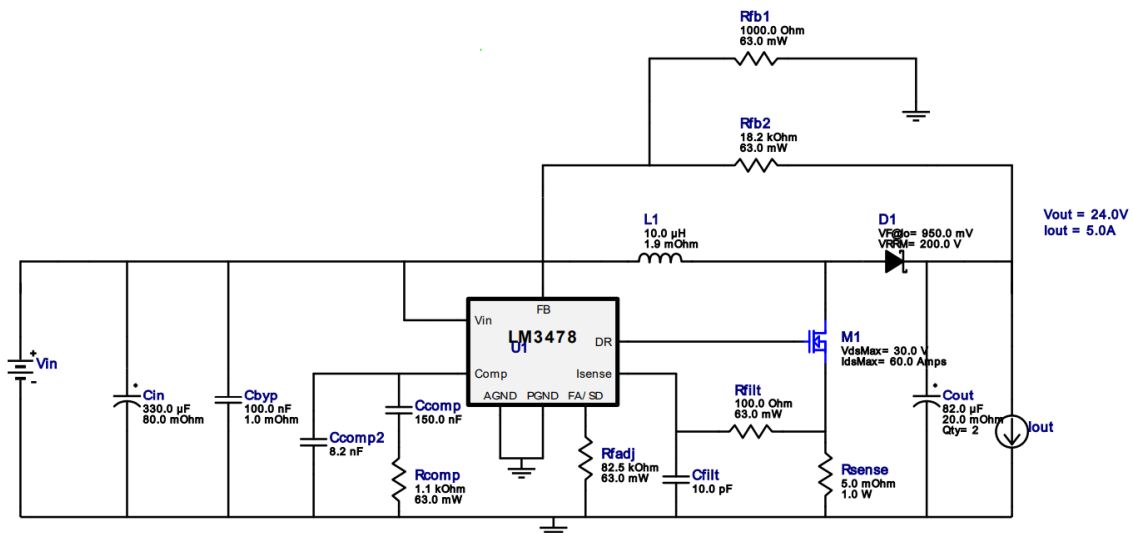


Figura 2.8: Esquemático del LM3478 que se implementará.

2.2.2. Simulaciones en WEBENCH POWER DESIGNER

Como herramienta adicional, WEBENCH POWER DESIGNER nos entrega resultados teóricos del funcionamiento del circuito de la figura 2.8 a implementar. Con estos resultados nos podemos adelantar al comportamiento que va a tener ésta etapa de conversión de voltaje, es de suma importancia alcanzar una robustez en el diseño del convertidor ya que todo el robot dependerá de él.

Las primeras mediciones realizadas, para comprobar que los valores de cada uno de los componentes es el correcto, corresponden al voltaje y corriente de salida. Como se observa en la figura 2.9, el voltaje oscila en torno a los 24V con un ripple pico a pico aproximado de 0.4V la alta frecuencia que se observa es a causa de la escala de tiempo utilizada. Recordar que se espera un voltaje de salida de 24V y una corriente de salida de 5A.

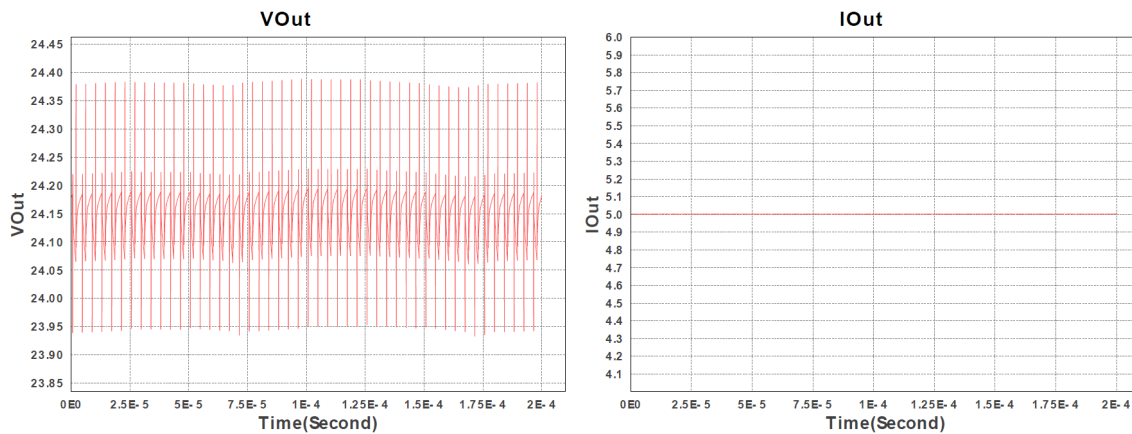


Figura 2.9: Voltaje V_{out} y corriente de salida I_{out} del convertidor boost.

Por otro lado, se aprecia que la corriente corresponde a los 5A esperado. Si bien estos primeros resultados son de carácter teórico ya se podría ir validando el esquemático y los valores de los componentes a utilizar. Hay que destacar que los gráficos de la figura 2.9 corresponden a los valores de la simulación en estado estacionario. Para obtener un resultado más representativo es que se realizarán algunas pruebas para analizar el comportamiento dinámico del circuito.

Se considera realizar tres pruebas para analizar el comportamiento dinámico del circuito, todas se podrían resumir en analizar el comportamiento del voltaje de salida a distintas perturbaciones. En la figura 2.10 se tiene la respuesta del voltaje de salida cuando se enciende el convertidor, en otras palabras, se aplica un escalón de voltaje de 0V a los 16V utilizados como voltaje de entrada en la simulación.

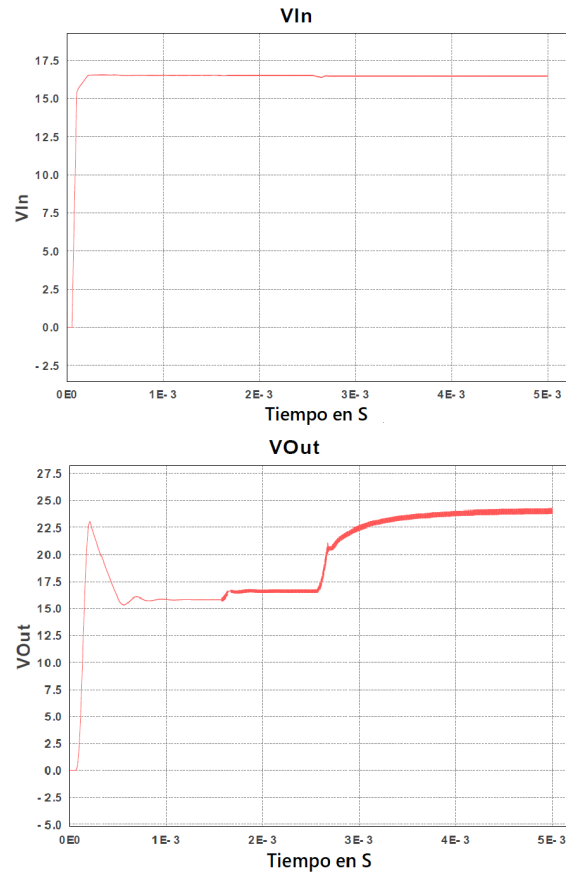


Figura 2.10: Comportamiento del voltaje de salida V_{out} cuando es encendido el convertidor.

El nivel de voltaje de 24V es alcanzado luego de transcurrir 4ms tiempo suficiente si analizamos la puesta en marcha de cada robot la cual comienza con todos los motores apagados y sin la señal de cargar el banco de condensadores, esto significa que en este primer momento se energiza toda el sistema de control y transmisión/recepción de paquetes de datos.

Las otras dos pruebas siguientes se realizaron aplicando un escalón de voltaje en la entrada V_{in}

entre los 11.1V y los 22V para los cuales se diseñó el convertidor, ver la figura 2.11. La otra prueba se realizó aplicando un escalón en la corriente de salida I_{out} entre los 5A a 0.5A ver la figura 2.12. Lo interesante de ambas pruebas es el comportamiento que tiene el voltaje de salida V_{out} que aparenta ser muy similar, esto se explica a que ambas perturbaciones aplicadas se relacionan con el mismo comportamiento en el lazo de control del circuito.

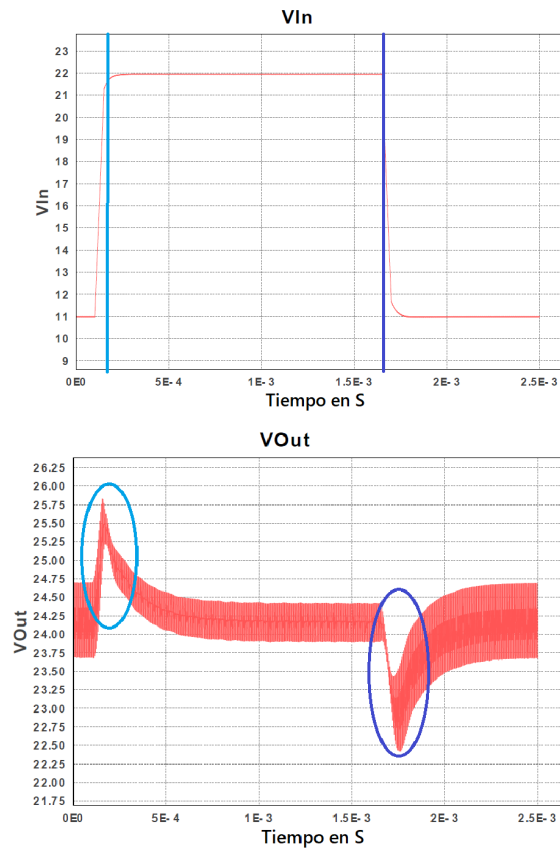


Figura 2.11: Comportamiento del voltaje de salida V_{out} cuando se aplica un escalón en el voltaje de entrada V_{in} .

Al cambiar la referencia del voltaje de entrada en la figura 2.11 hay un aumento en el voltaje de salida generando un exceso indicado en el círculo de color azul, luego al haber una disminución en la referencia se genera una caída en la tensión de salida, indicada en el círculo de color morado.

Algo similar ocurre en la figura 2.12 cuando hay una disminución en la corriente de salida I_{out} , ver marcas de color verde, en la que el circuito trata de mantener la actuación de voltaje para la

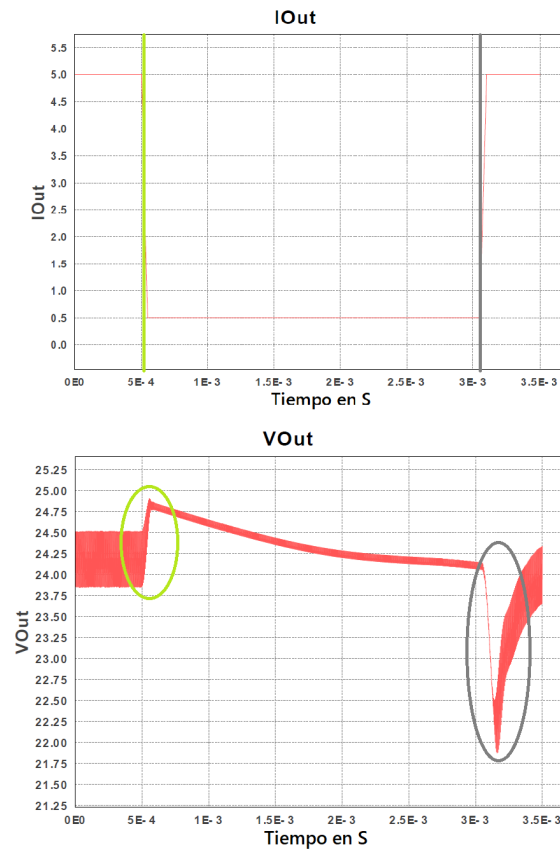


Figura 2.12: Comportamiento del voltaje de salida V_{out} cuando se aplica un escalón de la corriente de salida I_{out} .

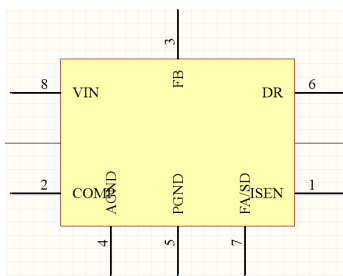
corriente de 5A pero al disminuir la corriente se genera un exceso en el voltaje, de forma análoga se podría entender el comportamiento cuando hay un aumento en la corriente demandada, ver las marcas de color gris, donde el voltaje cae a causa del nivel de corriente pero rápidamente se estabiliza el voltaje de salida en el valor determinado.

2.3. Diseño de tarjeta de circuito impreso PCB

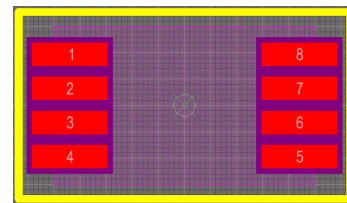
Para este punto, ya se tiene definida la composición del esquemático del LM3478 y mediante las simulaciones se ha logrado cumplir con los requisitos de funcionamiento impuesto por el equipo Sysmic Robotics por lo que se esta en condiciones de comenzar con la fabricación de la tarjeta de circuito impreso PCB.

Para el diseño se utilizó el software Altium Designer por su capacidad de generar un diseño en 3D (a diferencia de software similares), generación automática de la lista de componentes, herramientas de diseño, versatilidad, entre otras características. Al tratarse de un software de pago, la licencia es facilitada por el Centro Avanzado de Eléctrica y Electrónica, AC3E por sus siglas.

Por lo general, los software utilizados para el diseño de placas de circuitos separan el diseño en dos ambientes de trabajo, uno corresponde al esquemático donde se diseña el circuito y cada uno de los componentes estableciendo los nodos de conexión, y el otro entorno de diseño corresponde al "board" donde se hace el diseño de la tarjeta de circuitos como tal. Es en el board donde se trazan cada una de las pistas de cobre que representan a los nodos del esquemático. Un trabajo previo al desarrollo del esquemático en el software, corresponde al diseño de cada una de las librerías de los componentes a utilizar, en otras palabras, se refiere a la creación de la representación simbólica del componente conocida como Symbol en la figura 2.13a y la creación de la representación física del componente también llamada Footprint (figura 2.13b), es en esta última que se agrega el modelo 3D para generar una representación en 3D de la placa de circuitos. Como se muestra en la figura 2.17.



(a) Símbolo del LM3478



(b) Footprint del LM3478

Figura 2.13: Componentes de la librería en Altium Designer.

Una vez que se diseñan las librerías necesarias para el desarrollo de la placa de circuitos, se comienza por la creación del esquemático. En la figura 2.14 se tiene el circuito diseñado que corresponde al diseño obtenido con WEBENCH POWER DESIGNER de la figura 2.8. Con este diseño se espera obtener resultados similares a las simulaciones de la sección anterior, entendiendo que la aplicación puede diferir de los resultados teóricos debido a la influencia de diversos factores como el diseño de la PCB, valor de los componentes, etc.

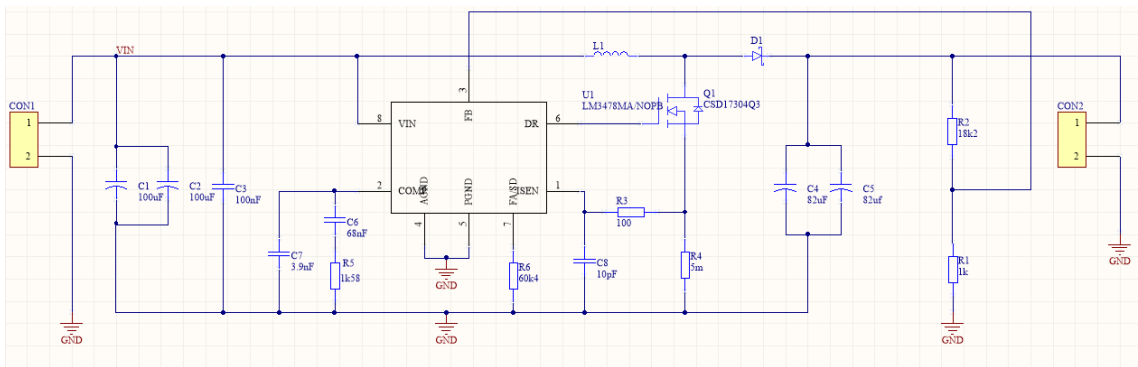


Figura 2.14: Esquemático boost en software Altium Designer.

Una vez finalizado el esquemático es turno de comenzar a trabajar en el entorno de trabajo del board, recordar que en esta etapa se ubican espacialmente cada uno de los componentes y se realizan las conexiones con las pistas de cobre.

El objetivo de este trabajo consiste en la validación del funcionamiento del convertidor boost y por ende, de cada uno de los componentes electrónicos seleccionados. Es por esta razón que se decide seguir cada una de las recomendaciones entregadas por el fabricante para el posicionamiento de algunos componentes. La adecuada ubicación de ciertos componentes permite maximizar las posibilidades de éxito en la reproducción de los resultados esperados, disminuyendo capacitancias e inductancias parásitas que puedan perjudicar el funcionamiento de esta etapa de conversión de voltaje. En una etapa futura se busca desarrollar una implantación y diseño en una única PCB que incluirá a ambos convertidores de voltaje, el boost y el flybak. En la figura 2.15 se muestra la distribución recomendada por el fabricante en la hoja de datos del LM3478.

Determinada la ubicación de los componentes, se comienza con la conexión de cada uno de los

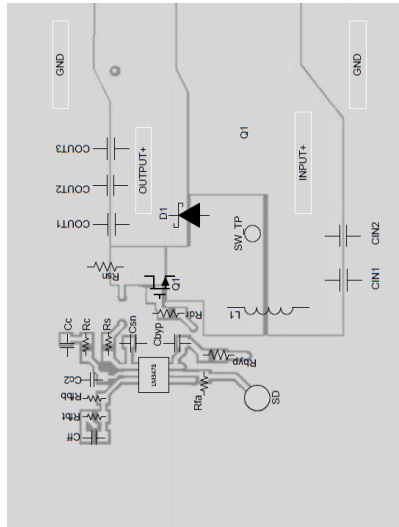


Figura 2.15: Distribución recomendada por Texas Instrument.

nodos definidos en el esquemático. Para el diseño se decidió utilizar una PCB de 4 capas, una capa superior conocida como Top, otra capa inferior llamada Bottom y otras dos capas intermedias. Para reducir al máximo la transmisión de ruido de alta frecuencia se utiliza una de las capas intermedia y la capa inferior como planos de tierra (o GND). Se tiene especial cuidado con aquellos nodos que conducen una cantidad importante de corriente al momento de dimensionar el ancho de pista, en algunos casos se prefiere la utilización de planos de interconexión para tener la mayor cantidad de cobre conductor disponible, ver figura 2.16, otra ventaja de usar un plano es que se transforma en una buena forma de disipar el calor de la energía desaprovechada.

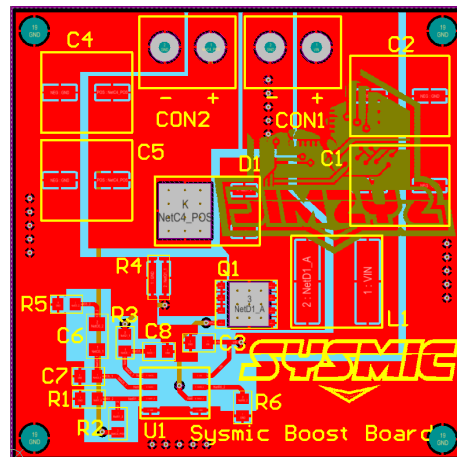
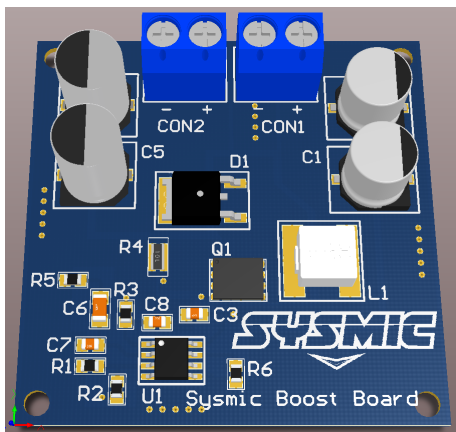
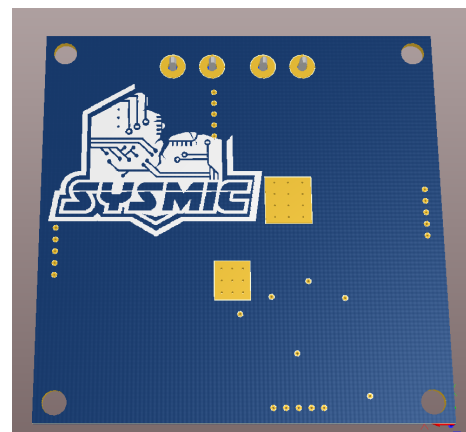


Figura 2.16: Diseño PCB boost en software Altium Designer.

Altium Designer permite desarrollar el diseño en 3D de forma simultánea al board exportando un archivo CAD que puede ser utilizado por el área de diseño mecánico del equipo Sysmic Robotics (ya que esta memoria se enmarca en el área de Hardware del equipo), de manera de anticipar la distribución de los espacios al interior de cada robot. La figura 2.17 corresponde a la visualización en 3D del diseño de la placa de circuito, además, con esta función se puede verificar que cada componente diseñado en las librerías tiene las dimensiones físicas correspondientes, característica que se vuelve de suma importancia cuando las compras son realizadas en el extranjero.



(a) Vista superior PCB boost



(b) Vista inferior PCB boost

Figura 2.17: Render PCB boost en software Altium Designer.

2.4. Montaje y pruebas de funcionamiento

Una de las problemáticas recurrentes con la que se encuentran este tipo de equipos como Sysmic Robotics, se relacionan con la dificultad de encontrar la gran variedad de componentes electrónicos en proveedores nacionales prefiriendo en muchos casos que la fabricación y compras de los diferentes componentes electrónicos sea realizada en el extranjero, estos muchas veces se traduce en una reducción de costos y tiempos de fabricación.

Particularmente para este trabajo de memoria, el trabajo de fabricación fue encargado a *PBC-way* y la compra de componentes se realizaron en *Mouser* y *Digikey*. En la figura 2.18 se pueden

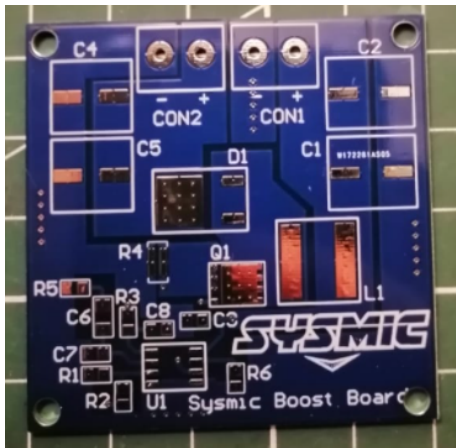
apreciar alguna de las características que se le indican al fabricante para el proceso de manufactura de la placa de circuitos.

The image shows the 'PCB Specification Selection' interface on the PCBWay website. The interface is organized into several sections with various options and input fields. The 'Board type' section has 'Single pieces' selected. The 'Different Design in Panel' section has '1' selected. The 'Size (single)' section has '100 X 100 mm' selected. The 'Quantity (single)' section has '5 pcs' selected. The 'Layers' section has '4 Layers' selected. The 'Material' section has 'FR-4' selected. The 'FR4-TG' section has 'TG 150-160' selected. The 'Thickness' section has '1.6' selected. The 'Min Track/Spacing' section has '6/6mil' selected. The 'Min Hole Size' section has '0.3mm' selected. The 'Solder Mask' section has 'Green' selected. The 'Silkscreen' section has 'White' selected. The 'Gold fingers' section has 'No' selected. The 'Surface Finish' section has 'HASL with lead' selected.

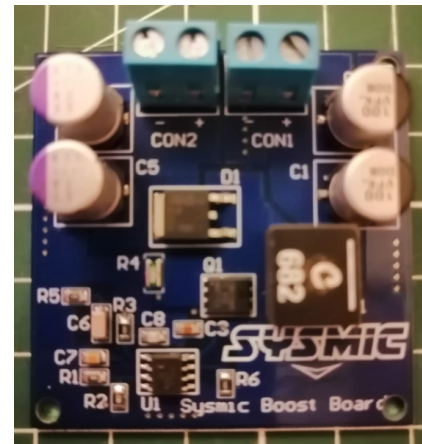
Figura 2.18: Fabricante Chino de tarjetas de circuito, PCBWay.

Al tratarse de una arquitectura con una cantidad reducida de componentes electrónicos, el montaje se realiza de una vez, por lo que no se puede ir soldando cada uno de los componentes para poblarlos por separados. La técnica empleada para soldar cada uno de los componentes es utilizando una pistola de aire caliente, pero previamente se debe depositar estaño en pasta con la ayuda de un stencil que tiene las perforaciones de todos los pads de la placa de circuito. Una vez depositado el estaño se posicionan cuidadosamente los componentes electrónicos para finalmente aplicar el aire caliente que funde el estaño soldando todo de una vez. Para serializar la fabricación se puede reemplazar la pistola de aire caliente por un horno de reflow en el que se pueden introducir varias PCB a la vez.

En la figura 2.19a se tiene la pcb que llega desde PCBWay y la figura 2.19b corresponde al



(a) PCB boost sin componentes electrónicos



(b) PCB boost con componentes electrónicos soldados

Figura 2.19: PCB del convertidor boost fabricada.

convertidor boost finalizado, con los componentes electrónicos soldados y listo para ser probado.

2.4.1. Discusión de resultados obtenidos

Se llevaron a cabo una serie de pruebas para poder validar el funcionamiento del convertidor boost y se incluyó un estudio de la cantidad de corriente que consume el robot en diferentes escenarios, esta información fue incluida en el "Team Description Paper (TDP)" que le permitió al equipo clasificar al certamen mundial de robótica. Como el objetivo del TDP era la clasificación, los resultados obtenidos no se relacionan con la información obtenida de las simulaciones, pero sí se cumple con los requisitos de diseños sobre el voltaje y corriente de salida.

Se realizaron diversas pruebas para determinar la relación entre la batería de la figura 2.20 y el consumo de corriente del robot cuando está en el campo de juego. Se espera poder determinar la cantidad de corriente utilizada en un determinado tiempo para cuantificar la energía mínima que debería almacenar la batería de cada robot, con la finalidad de utilizar una batería correctamente dimensionada en capacidad de energía almacenada y tamaño físico.

En primer lugar, se estudiará el comportamiento de la resistencia interna de la batería y como varía cuando hay un aumento de la corriente promedio. Luego de aplicar una serie de pruebas, se



Figura 2.20: Batería de litio LiPo de 6 celdas y 22.2V 1500mAh 75C

determinó que responde a la relación de la ecuación 2.1. La figura 2.21 muestra el aumento de R_T y eso implicaría una caída máxima de voltaje aproximado de 0.25V en la salida a medida que se le exige una mayor corriente a la batería.

$$R_T = 0,0571I - 0,0506[\Omega] \quad (2.1)$$

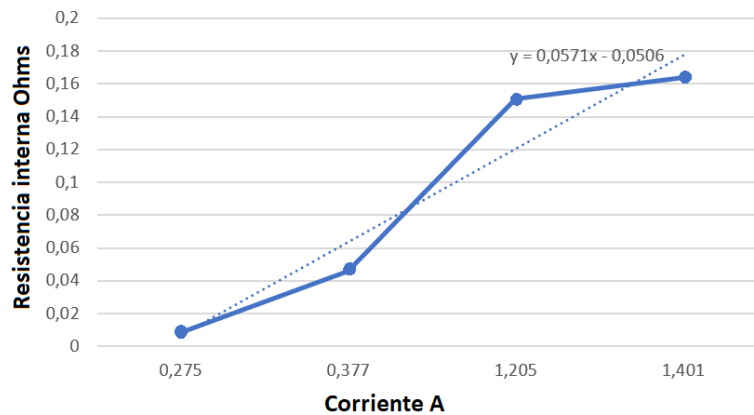


Figura 2.21: Resistencia interna.

Conociendo el comportamiento de la resistencia interna se puede estimar cual será el voltaje entregado al robot, y así, obtener una mejor estimación para determinar la batería óptima que se desea integrar para tiempo de funcionamiento determinado.

La figura 2.22 muestra el consumo de corriente versus el tiempo cuando el robot cronológicamente ejecuta las acciones de iniciar el dribbler, los motores, motores en conjunto con el dribbler y el dribbler accionado de forma gradual.

Cuando el tren motriz y el dribbler a causa de su inercia generan un pulso de corriente que se aprecia en la figura anterior. El consumo de corriente pico es de 2.11A (8.44A en total con lo 4 motores) y 1.1A respectivamente.

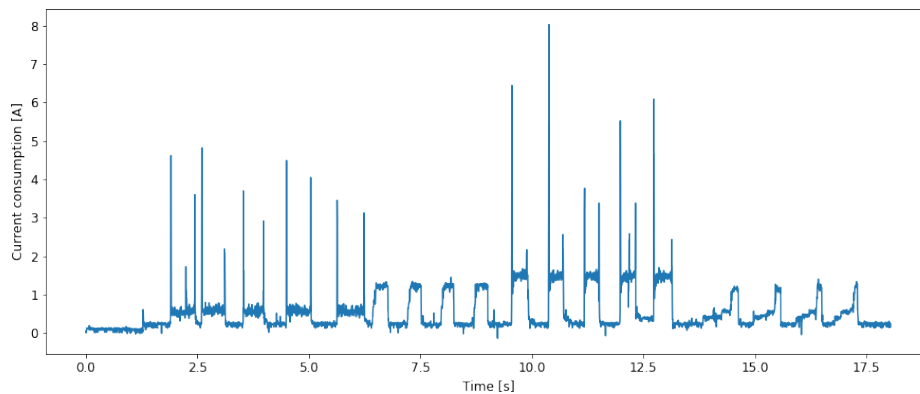


Figura 2.22: Consumo de corriente en pruebas controladas.

Un resultado interesante que se puede obtener con las pruebas realizadas y graficadas en la figura 2.22 es la caracterización de cada componente (motor, dribbles, pateador) según el consumo de corriente, en otras palabras, si nos fijamos en la figura 2.23 en el recuadro rojo identificamos el consumo de corriente cuando funcionan los cuatro motores del tren motriz, luego, en verde se registra el consumo de corriente del motor del dribbler funcionando a máxima velocidad, el morado corresponde con el funcionamiento del tren motriz y el dribbler simultáneamente y se finaliza con el funcionamiento del dribbler a velocidad gradual.

Una vez que se logra identificar el consumo de corriente de cada uno de los componentes, se puede realizar una estimación del consumo de corriente de la totalidad del robot, recordar que el objetivo es poder cuantizar la corriente necesaria para que el robot funcione un medio tiempo de partido, y así, determinar la batería de capacidad y tamaño óptimo.

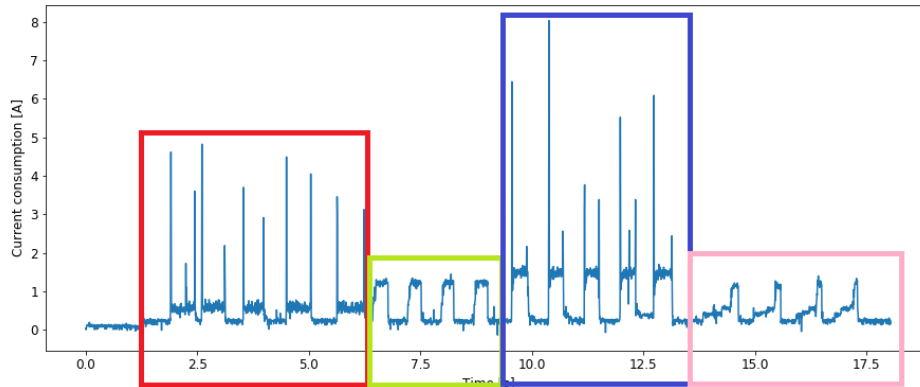


Figura 2.23: Caracterización de funcionamiento según corriente consumida.

Estado	Potencia consumida	Corriente
Circuito ON	3.5 [W]	160 [mA]
Motor sin carga	1.498 [W]	66.435 [mA]
Motor con carga	23.463 [W]	1050.359 [mA]
Dribbler sin carga	4.346 [W]	192.843 [mA]
Dribbler con carga	4.99 [W]	222.787 [mA]

Tabla 2.1: Potencia consumida y corriente promedio consumida por la PCB, motores y dribbler.

La tabla 2.1 registra los valores para la potencia promedio y corriente promedio para el encendido de la PCB, consumo de 1 motor del tren motriz (sin y con carga), motor del dribbler (sin y con carga) en diferentes circunstancias. Se ha podido concluir lo siguiente:

- Energizar el robot sin movimientos se calcula una autonomía máxima de aproximadamente 9 horas y 20 minutos.
- Encender el robot, en la cancha, a máxima velocidad con la pelota en el dribbler y cargando el banco de condensadores del pateador, se calcula una duración aproximada de 1 hora. Considerando picos repetitivos de corriente de 1.784 A promedio que duran alrededor de 5ms aproximadamente, con una frecuencia de 49 picos por segundo, medidos con el robot funcionando durante media hora, se obtuvo un promedio de consumo de 437.08A lo que agotaría la batería en 47 minutos aproximadamente.
- El peso mecánico del robot sobre las ruedas genera un gasto de potencia de 21,965W, equi-

valente a 983,924mA reduciendo la duración de la batería a 39 minutos. Esto se midió con el robot suspendido a máximo rendimiento, en el aire con los motores sin ninguna superficie de fricción más que el peso de la propia estructura de la rueda, y luego en la cancha.

- Contacto del dribbler con la pelota oficial genera un consumo de 0.644W.

El consumo de energía medido nos permite verificar que las baterías utilizadas son suficientes para 15 minutos de autonomía. Sin embargo, dado que el robot no tiene corriente picos superiores a 10 [A], es posible elegir una batería de 15C de corriente de descarga. Con estos datos, se propone utilizar el convertidor boost en combinación con una batería de 4S 14.4V de 500 mA h y una tasa de descarga de 20C.

Capítulo 3

Diseño e implementación convertidor DC-DC Flyback

En esta sección se describe el diseño y construcción de la nueva versión del convertidor DC-DC encargado de suministrar la energía necesaria al banco de condensadores del pateador del robot. Los resultados obtenidos se contrastarán con el desempeño obtenido en la versión previa del pateador del robot, además se detallará el montaje electrónico, pruebas de desempeño y la evaluación de los resultados obtenidos.

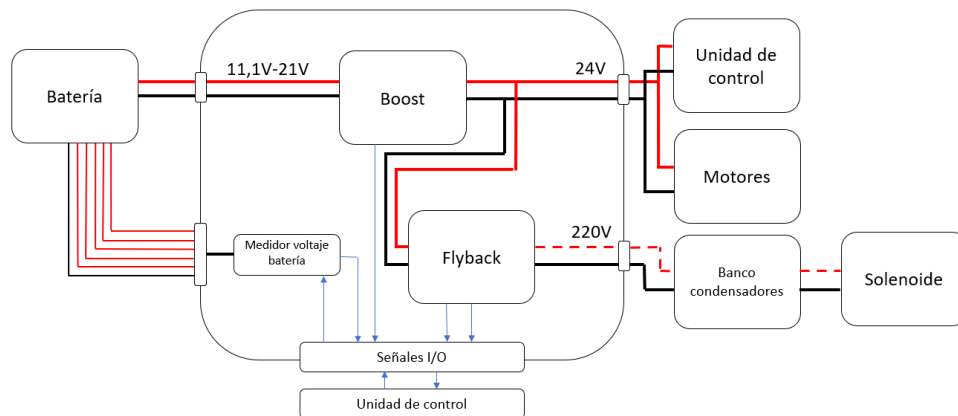


Figura 3.1: Diagrama de bloques generalizado de la propuesta inicial del tema de memoria.

La principal razón por la que se decidió utilizar un convertidor flyback es a causa del primer pateador, consistía en un convertidor boost el cual estaba limitado por la relación de conversión

pudiendo obtener 120V y el tiempo de carga de aproximadamente 4s. Estudiando la literatura y el estado del arte de la competencia, se llega a la conclusión que un convertidor flyback podría cumplir con los requisitos de cargar el banco de condensadores a 220V en el menor tiempo posible gracias al uso del inductor acoplado que posee, con la razón entre sus bobinas se podría alcanzar una mayor tensión de salida en comparación a un convertidor boost. Otro factor decisivo es la simpleza en la implementación de este tipo de convertidores al necesitar una cantidad reducida de componentes.

3.1. Topología propuesta

El convertidor flyback es un convertidor DC-DC con aislamiento galvánico entre la entrada y la salida gracias a sus dos bobinas acopladas magnéticamente; erróneamente, se suele hablar de un transformador como elemento de aislamiento, pero en realidad no es así, puesto que un transformador no almacena mas que una mínima parte de la energía que maneja, mientras que el elemento inductivo del flyback almacena toda la energía en el núcleo magnético. Esta es la razón por la que el dispositivo inductivo de este tipo de convertidores es mucho más voluminoso para una misma frecuencia de conmutación dada, por este motivo, este convertidor se suele usar en aplicaciones de baja potencia.

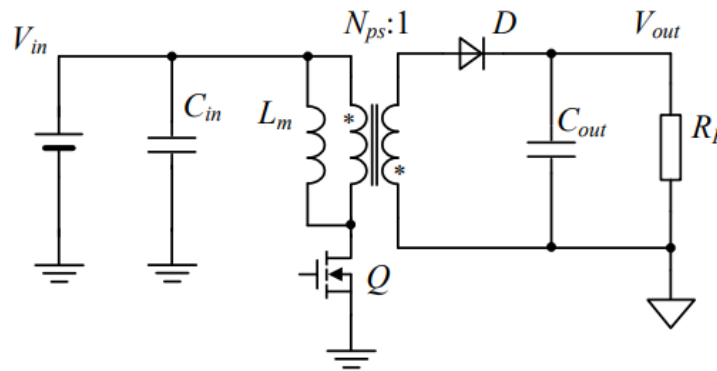


Figura 3.2: Esquema generalizado convertidor DC-DC flyback.

3.1.1. Estructura y funcionamiento

La figura 3.2 corresponde al diagrama general del convertidor DC-DC flyback, de él se desprenden dos estados de operación de acuerdo a la posición en la que se encuentra el interruptor, ambos estados están representados en la figura 3.3.

Cuando el interruptor está encendido, la bobina primaria esta conectada directamente a la fuente de alimentación, esto provoca un incremento en el flujo magnético del núcleo. La tensión en el secundario es negativa, por lo que el diodo está en polaridad inversa (bloqueando). El condensador de salida es el único que proporciona energía a la carga.

El flujo $\phi(t)$ aumenta de forma lineal según la ecuación

$$\phi(t) = \phi(0) + \frac{V_d}{N_1}t \quad 0 < t < t_{on} \quad (3.1)$$

y el flujo pico $\hat{\phi}$ al final del intervalo de encendido se da como:

$$\hat{\phi} = \phi(t_{on}) = \phi(0) + \frac{V_d}{N_1}t_{on} \quad (3.2)$$

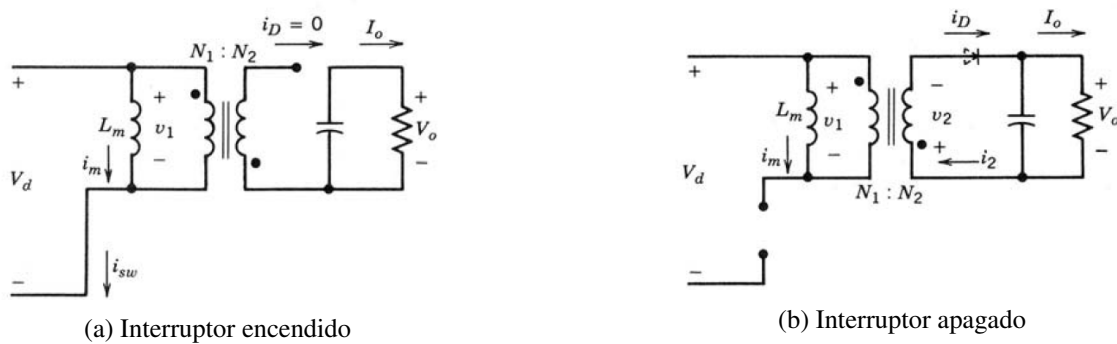


Figura 3.3: Estados de operación del convertidor según el estado del interruptor.

En el otro caso, nos encontramos con el estado cuando el interruptor está abierto. La energía almacenada en el núcleo magnético es transferida a la carga y al condensador de salida debido a que el diodo está conduciendo. Notar que el voltaje en la bobina primaria es de signo opuesto al voltaje de la bobina secundaria $v_2 = -V_0$, y por ende el flujo disminuye en forma lineal durante

t_{off} .

$$\phi(t) = \hat{\phi} - \frac{V_0}{N_2}(t - t_{on}) \quad t_{on} < t < T_s \quad (3.3)$$

y

$$\begin{aligned} \phi(T_s) &= \hat{\phi} - \frac{V_0}{N_2}(T_s - t_{on}) \\ &= \phi(0) + \frac{V_d}{N_1}t_{on} - \frac{V_0}{N_2}(T_s - t_{on}) \quad (\text{ecuación 3,2}) \end{aligned}$$

Finalmente se tiene:

$$\frac{V_o}{V_d} = \frac{N_2}{N_1} \cdot \frac{D}{1 - D} \quad (3.4)$$

donde se cumple que el flujo neto a través del núcleo a lo largo de un periodo debe ser cero en estado estacionario. $\phi(T_s) = \phi(0)$ y donde $D = t_{on}/T_s$.

De modo gráfico se puede determinar el funcionamiento del convertidor en función de los gráficos del voltaje v_1 , el flujo magnético en el núcleo ϕ y la corriente que circula por el diodo i_D .

En la figura 3.4 se aprecian cada una de las curvas en los dos estados de operación posible: interruptor encendido y el interruptor apagado. Cuando se encuentra encendido, el voltaje v_1 de la bobina primaria alcanza el voltaje de alimentación V_d y en consecuencia el flujo magnético en el núcleo comienza a aumentar.

Cuando el interruptor se encuentra apagado, el flujo magnético en el núcleo induce un voltaje en el devanado secundario de signo opuesto a v_1 y magnitud $\frac{N_1}{N_2}V_o$, en consecuencia disminuye el flujo y comienza a circular una corriente a través del diodo D .

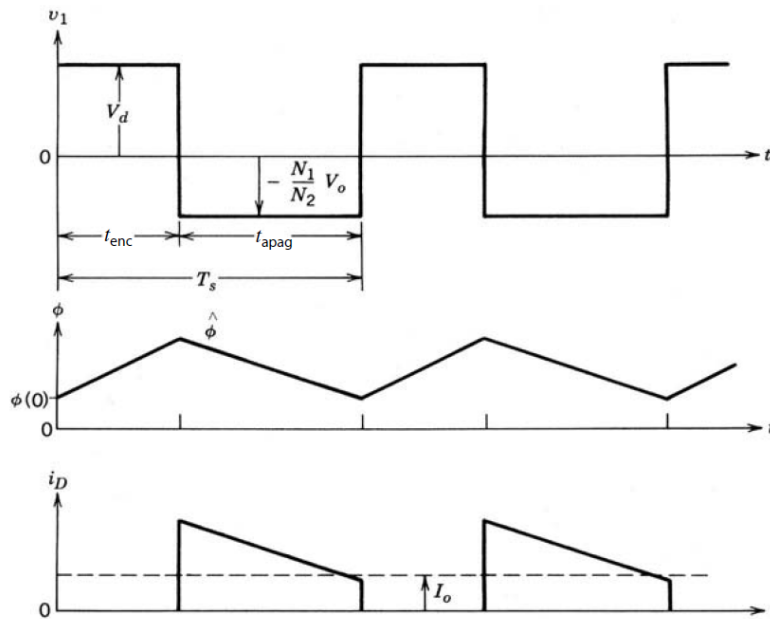


Figura 3.4: Formas de onda del funcionamiento del convertidor flyback.

3.2. Diseño de esquemático y simulaciones

A partir de la experiencia obtenida en la construcción de uno de los robots del equipo Sysmic, y en base al diseño y construcción de un convertidor boost que cumplía la función de cargar el banco de condensadores (ver figura 3.5) se pudieron fijar los requerimientos de diseños necesario para la nueva arquitectura del convertidor. De los resultados observados en la versión previa, el boost tarda alrededor de 4s en cargar el banco de condensadores a 120V considerándose un tiempo excesivo para la dinámica de los partidos.

Es por lo anterior que se busca una nueva topología capaz de cargar en el menor tiempo posible. Un convertidor flyback al tener un elemento inductivo con relación de vuelta entre sus bobinas, logra una capacidad de elevación mayor a un boost. Además, se elige esta nueva topología luego de una revisión del estado del arte de los equipos participantes de la Robocup y la literatura de convertidores DC-DC de este nivel de potencia.

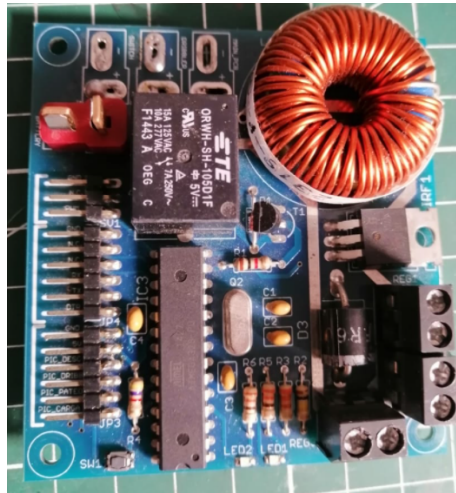


Figura 3.5: Versión previa del pateador basado en la topología boost.

3.2.1. Diseño de Esquemático

El circuito integrado que se utilizará para el convertidor flyback es uno que ya poseía el equipo Sysmic Robotics y por conceptos de abaratar costos y aprovechar el equipamiento disponible el desarrollo de este capítulo se basará en él. El LT3751 es un controlador para flyback diseñado para cargar rápidamente un banco de condensadores de gran capacidad. El voltaje de salida se puede determinar con 3 resistencias y un inductor que posee una relación de vueltas entre sus devanados.

Para poder determinar el esquemático a utilizar es de suma importancia referirse a la hoja de datos del LT3751. En ella se pueden encontrar las distintas configuraciones en las que puede funcionar el chip, pero especialmente se revisan las *Typical Application* que es la literatura en la que aparecen implementaciones documentadas desde el diseño hasta la fabricación del PCB.

De las configuraciones posibles, el punto de partida para el diseño del convertidor es el circuito de la figura 3.6 correspondiente a una *Typical Application*. Las condiciones de funcionamiento del circuito de la figura 3.6 cumplen con parte de los requerimientos de diseño del convertidor flyback requerido por el equipo Sysmic; la tensión de entrada es de 24V pero la tensión de salida de 500V que se podría modificar para cumplir con los requerimientos establecidos.

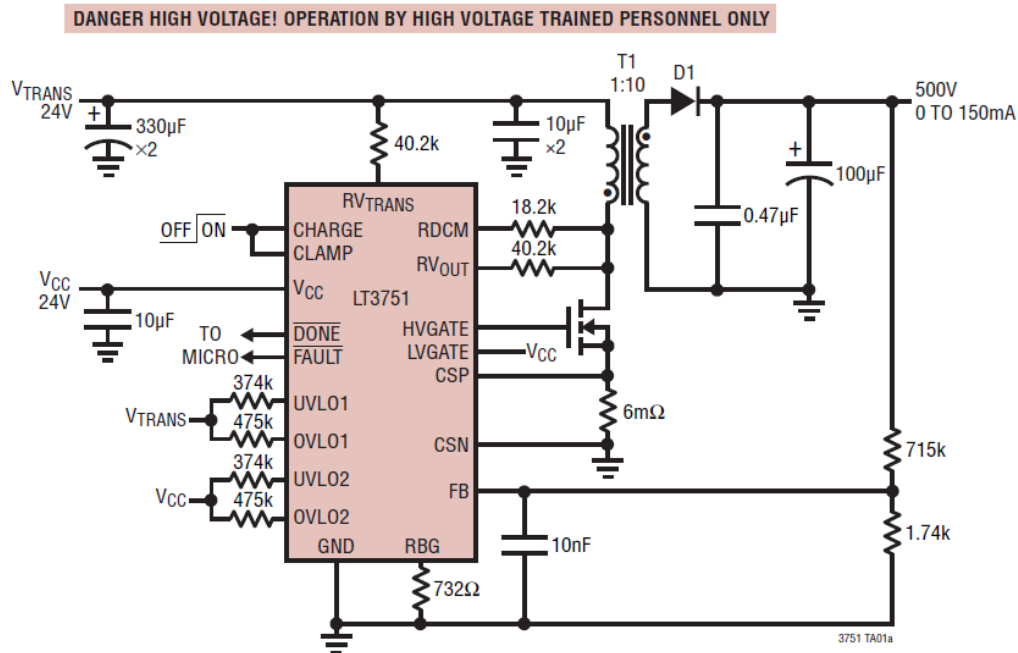


Figura 3.6: Typical application especificada en la hoja de datos del fabricante.

3.2.2. Simulaciones en LTspice XVII

El LT3751 es fabricado por *Linear Technology* compañía que también desarrolla el software de simulaciones LTspice y que será utilizado para obtener algunos resultados teóricos. En las librerías incluidas se puede encontrar un modelo funcional del LT3751 el cual simula el comportamiento del chip y se utilizará de referencia para determinar el circuito que permita obtener la tensión de salida deseada para cargar el banco de condensadores. Con la ayuda de la hoja de datos se realizan las modificaciones a la topología de la figura 3.6 para obtener el esquemático que cumpla con los requisitos de diseño con lo que se obtiene el circuito de la figura 3.7 que será utilizado en las simulaciones.

Algunas variaciones que podemos apreciar son la ausencia del divisor resistivo que sensa el voltaje a la salida y la modificación de la resistencia R_{BG} para obtener el voltaje de 220V requeridos. En la figura 3.7 aparecen los componentes adicionales utilizados para la simulación de funcionamiento del circuito.

Las condiciones simuladas corresponden al voltaje de entrada 24V solicitados, que debe co-

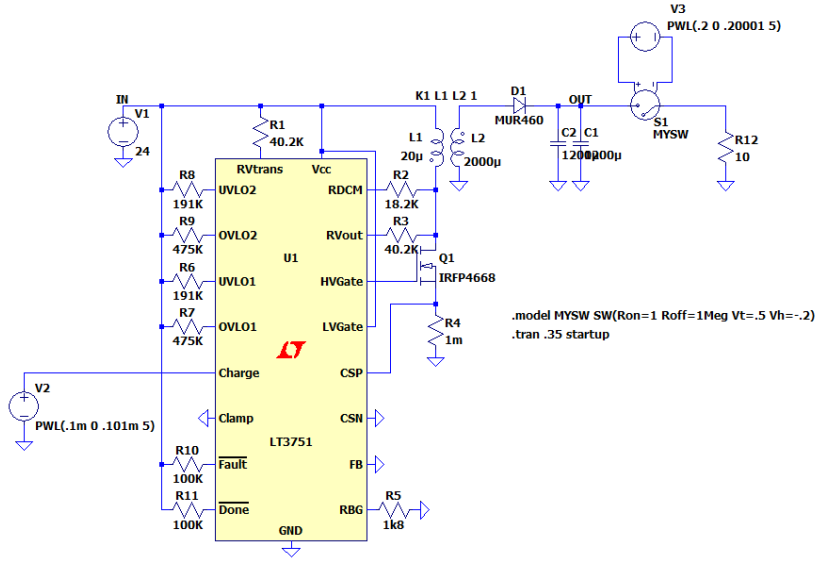


Figura 3.7: Esquemático utilizado en las simulaciones en LTspice

menzar el ciclo de carga con un pulso de 5V en el pin 'Charge', el voltaje de salida se debe alcanzar en menos de 1s y la descarga del banco de condensadores debe ser el equivalente al utilizar el solenoide del pateador del robot.

El resultado más satisfactorio se obtuvo para un valor de $R_{BG} = 1k8\Omega$ el que permite alcanzar los 220V requeridos en un tiempo aproximado de 150ms tal como aparece en la figura 3.8. El otro comportamiento de interés que se aprecia es la descarga del banco de condensadores en el sistema de pateo de la figura 3.9. Las curvas graficadas corresponden a la carga y descarga del banco de condensadores.

Con este primer resultado se validan los valores de cada componente para configurar el modo de operación implementado en LTspice.

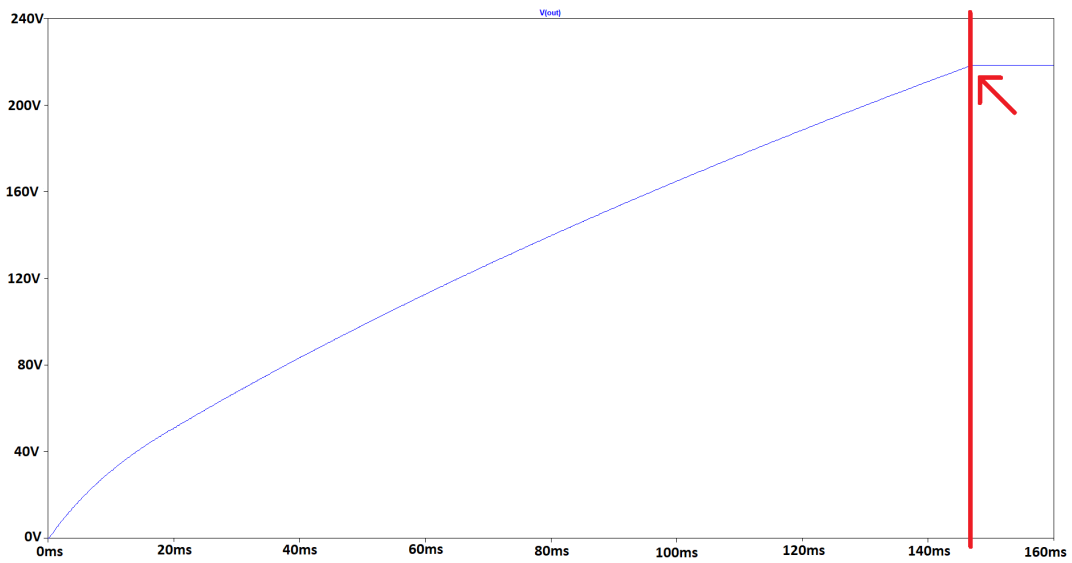


Figura 3.8: V_{out} : Voltaje del banco de condensadores.

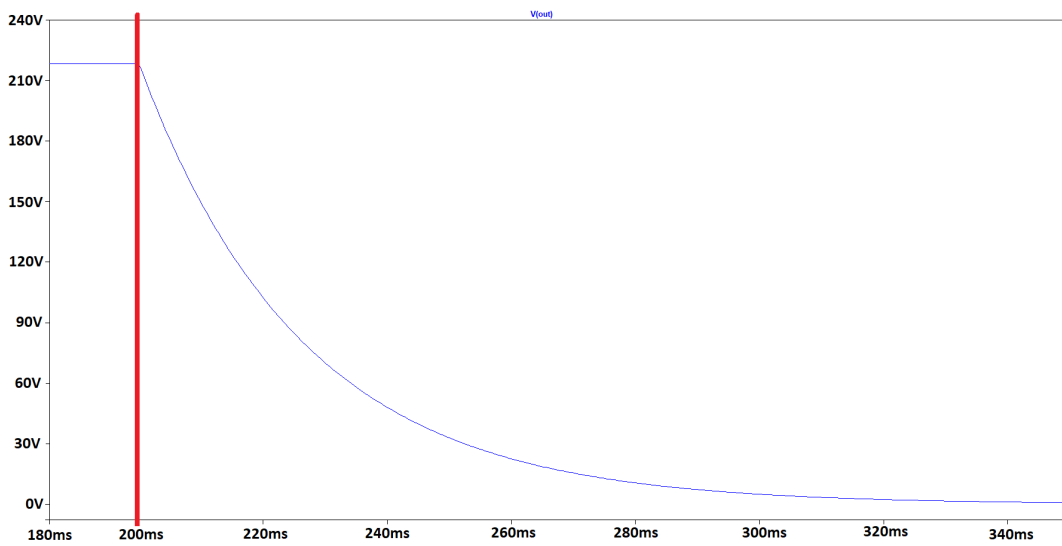


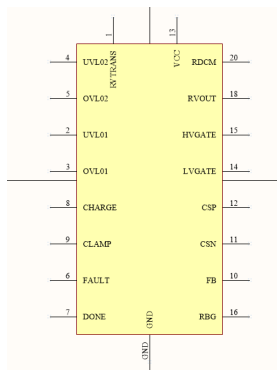
Figura 3.9: V_{out} : Voltaje del banco de condensadores al simular la descarga en el solenoide.

3.3. Diseño de tarjeta de circuito impreso PCB

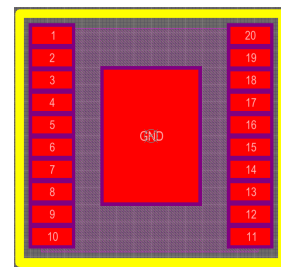
Una vez que se determina la configuración para el LT3751 y que además se cumplen los requerimientos de diseño, se comienza con el diseño de la placa de circuito que será utilizada en las pruebas de funcionamiento en un robot del equipo Sysmic. Este primer circuito servirá para validar el funcionamiento, posteriormente se diseñará la PCB que integrará el boost y flyback.

Para el diseño se ha de preferir el software Altium Designer por su capacidad de generar un diseño en 3D, generación automática de la lista de componentes, herramientas de diseño, versatilidad, entre otras características. Al tratarse de un software de pago, la licencia es facilitada por el Centro Avanzado de Eléctrica y Electrónica, AC3E por sus siglas.

Al igual como se detalló en el capítulo anterior, un trabajo previo al desarrollo del esquemático en el software, corresponde al diseño (en caso de ser necesario) de cada una de las librerías de los componentes a utilizar. En la figura 3.10b se muestra el símbolo y footprint del LT3751.



(a) Símbolo del LT3751



(b) Footprint del LT3751

Figura 3.10: Componentes de la librería en Altium Designer.

Una vez que se diseñan las librerías necesarias para el desarrollo del diseño, se comienza por la creación del esquemático. En la figura 3.14 se tiene el circuito diseñado, que corresponde al diseño utilizado en el software LTspice. Con este diseño se espera reproducir los resultados obtenidos en la simulación entendiendo que la aplicación en la PCB puede diferir de los resultados teóricos, debido al comportamiento real de los componentes. Hay recomendaciones en la ubicación de ciertos componentes, como la cercanía entre el gate-driver y el gate del MOSFET, que permiten maximizar las posibilidades de éxito en la reproducción de los resultados.

Adicionalmente, se incorporó el diseño del controlador del pateador, esto quiere decir, el circuito que se encarga de realizar la descarga del banco de condensadores según la señal de pateo

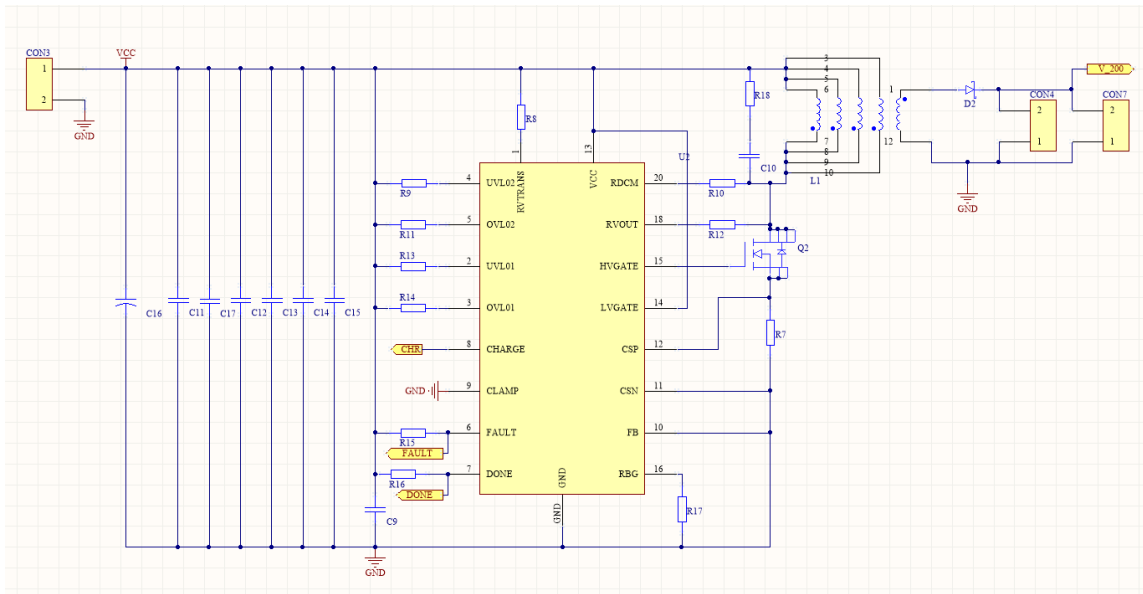


Figura 3.11: Diseño esquemático flyback en software Altium Designer.

proveniente del microcontrolador central. El circuito corresponde al de la figura 3.12.

Este circuito comprende la utilización de un FAN3229 (driver para IGBT) y 2 IGBT. Uno de los IGBT es el encargado de dejar pasar la energía hacia el banco de condensadores, y el otro corresponde a un dispositivo de seguridad que se encarga de descargar el banco de condensadores en una resistencia para evitar las descarga no intencionadas de voltajes. También se aprecia la utilización de dos ADUM7442 que corresponden a aisladores de señal, muy similares al funcionamiento de opto-acopladores, pensados para aislar de cualquier ruido electrónico la placa de control principal de la figura 1.5 generados por la conmutación de los semiconductores.

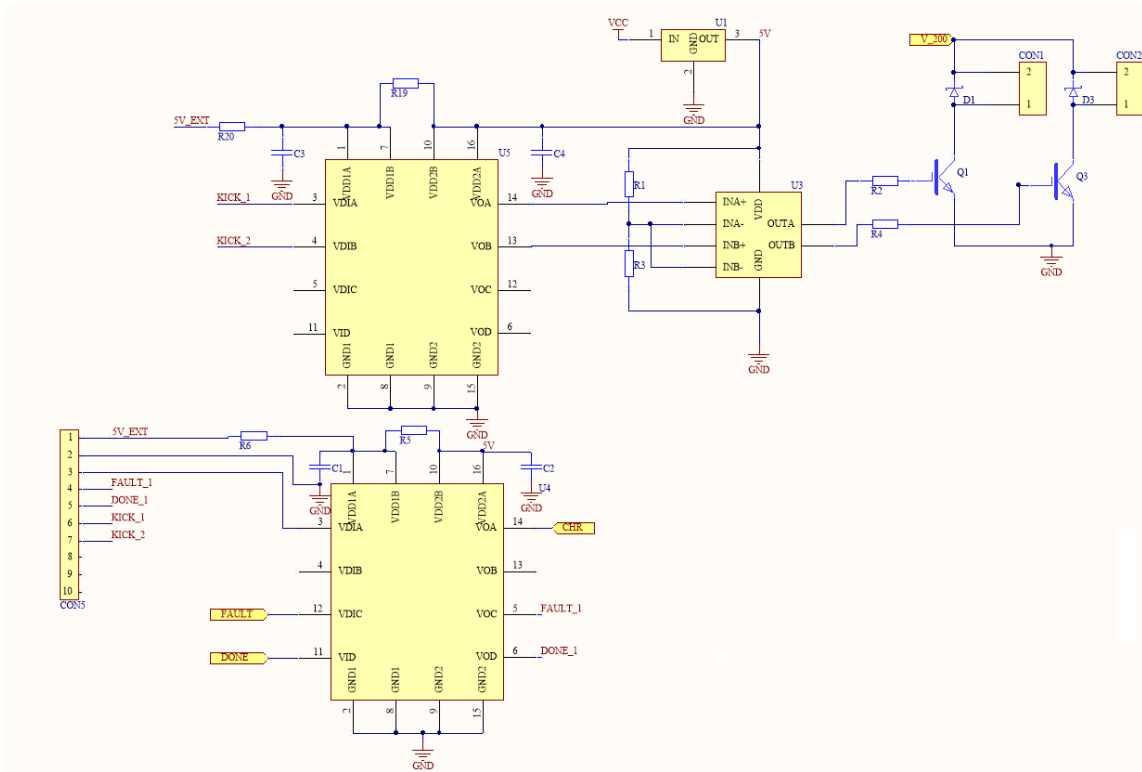


Figura 3.12: Diseño PCB driver de padeo en software Altium Designer.

El siguiente paso a desarrollar, corresponde al diseño de la placa de circuito en el software Altium Designer. Con el esquemático finalizado se exportan al entorno de desarrollo del board y se comienzan a ubicar dentro de las dimensiones físicas de la tarjeta que están limitadas por la disponibilidad de espacio en el robot.

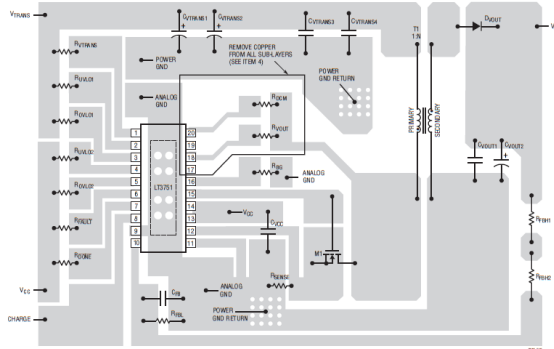


Figura 3.13: Distribución recomendada por Linear Technology.

El objetivo de esta etapa consiste en la reproducción de los resultados teóricos y la validación de los componentes seleccionados, es por esta razón que se decide seguir cada una de las recomendaciones entregadas por el fabricante en la hoja de datos y las *Application Notes*. En una etapa futura se busca desarrollar una implantación y diseño creado por Sysmic que integra al convertidor flyback y boost. En la figura 3.13 se tiene el diseño recomendado por el fabricante para ubicar los componentes claves del circuito.

Finalmente, determinada la ubicación de cada uno de los componentes, se comienza con la conexión de los nodos definidos en el esquemático. Se decidió la utilización de una placa de circuitos de 4 capas para reducir al máximo la transmisión de ruido de alta frecuencia producto de la conmutación del MOSFET, utilizar una de las capa como tierra GND y las otras capas utilizadas en la transmisión de señales eléctricas. Para los nodos que conducen una cantidad de energía importante se prefiere la utilización de planos de interconexión para tener la mayor cantidad de cobre conductor disponible, otra ventaja de usar un plano es que se transforma en una buena forma de disipar el calor de la energía desaprovechada.

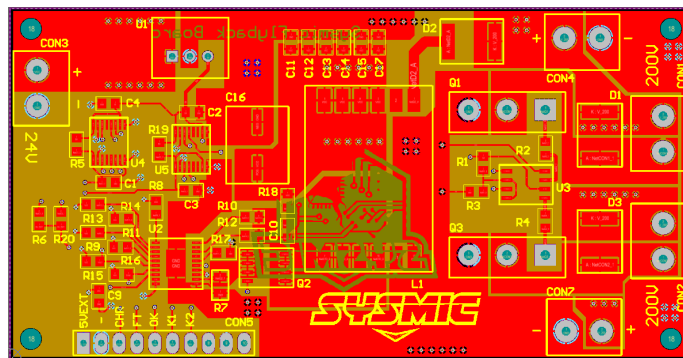


Figura 3.14: Diseño PCB flyback en software Altium Designer.

Al igual como se describió en el capítulo anterior, se utiliza el diseño en 3D para corroborar que cada componente es elegido correctamente, disminuyendo los riesgos de cometer errores al momento de realizar la compra en el extranjero.

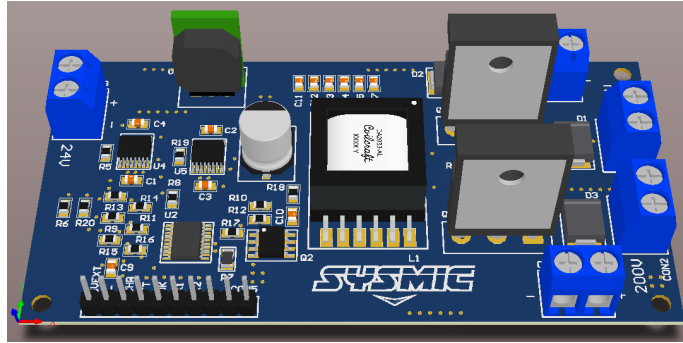


Figura 3.15: Render PCB flyback en software Altium Designer.

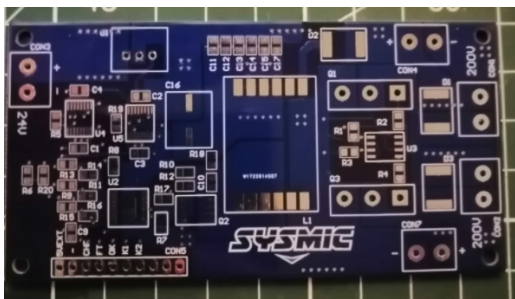
3.4. Montaje y pruebas de funcionamiento

Al tratarse de un diseño con múltiples componentes se debe trabajar en un plan de pruebas que permita ir validando el funcionamiento paso a paso de la totalidad de la PCB. El montaje y soldadura se hará en función de "módulos" que se enumeran como sigue.

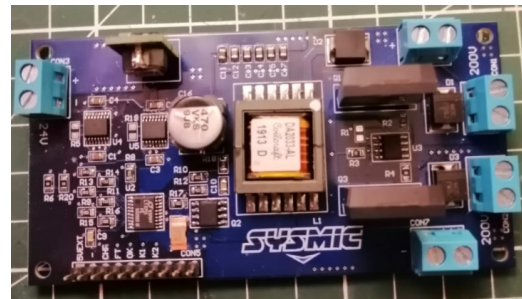
- Regulación de voltaje: se realiza el montaje del regulador DC-DC de 5V, luego se hacen mediciones en distintos lugares de la tarjeta para verificar que el voltaje se transmita sin problemas.
- Señales de control: se posiciona el arreglo de conectores que reciben las señales de control y adicionalmente se sueldan los aisladores ADUM7442. En este módulo se debería medir el voltaje en cada una de las señales de control, en otras palabras, se energiza la PCB y se conectan niveles lógicos al pin-header para verificar que a la salida de los aisladores se obtienen los niveles de tensión esperados.
- Driver de pateo: en este punto se sueldan los IGBT, el driver que controla el disparo de cada transistor y los conectores de bloque de salida. Una vez todo soldado, se alimentará la PCB y se conectará la señal de control, en el pin-header, correspondiente al pateador esperando medir el voltaje del banco de condensadores en los bornes donde se conecta el solenoide, esto simularía la descarga del banco de condensadores y el robot patearía la pelota.
- LT3751 flyback: de todos los módulos descritos anteriormente este corresponde al de mayor complejidad, es importante que se valide el funcionamiento de todo el resto de módulos antes de comenzar el montaje del LT3751 dado que la posibilidad de fallo es la más alta por

la gran cantidad de componentes y variables que afectan el funcionamiento. Como resultado esperado, el voltaje del banco de condensadores debe aumentar a la orden de la señal de control que inicia la carga y llegar a los 220V esperados.

La metodología empleada para soldar cada uno de los módulos descritos fue variada según los requerimientos de los encapsulados de los componentes, se hizo uso de soldadura por caudín, con una estación de soldar ERSA, utilización de pistola de aire caliente y estaño en pasta para soldar, montaje con horno de reflow. La soldadura con horno será la metodología empleada una vez que se valide el funcionamiento de toda la PCB, requiere la utilización de estaño en pasta y el stencil de todos los pads de la placa de circuito, logrando un ahorro en el tiempo empleado en la fabricación de cada tarjeta.



(a) PCB flyback sin componentes electrónicos



(b) PCB flyback con componentes electrónicos

Figura 3.16: PCB del convertidor flyback fabricada.

3.4.1. Discusión de resultados obtenidos

En este punto se deberían comentar los resultados obtenidos en el convertidor y si estos se corresponden con los resultados esperados de la simulación y los requerimientos de diseño, lamentablemente no se pudo superar la prueba del último módulo *LT3751 flyback* incluso cuando todos los módulos anteriores funcionaban a la perfección. Como no fue posible reproducir los resultados esperados, se comienza con el desarrollo de un set de pruebas que permitan identificar cual es la problemática que causa que el circuito pueda iniciar el ciclo de carga.

Alguna de las anomalías observadas corresponden a una carga errática del banco de condensadores, era necesario un tren de pulsos para lograr 200V (tan solo necesita una tensión de 5V), luego de varios ciclos de carga se empiezan a notar otras problemáticas, aumento de temperatura en el mosfet, no fue posible obtener nuevos ciclos de carga y falla en módulo de señales de control.

Finalmente, producto de la emergencia sanitaria no se pudo seguir con las pruebas para la identificación del error que causaba que el flyback no funcionase siendo una tarea comprendida para el trabajo futuro.

Capítulo 4

Conclusiones y trabajo futuro

4.1. Discusión sobre resultados obtenidos

En este trabajo de memoria se estudiaron, diseñaron e implementaron prototipos experimentales de los módulos de conversión de voltaje del robot del equipo Sysmic Robotics. Ambas plataformas cumplen el propósito de cumplir el objetivo del equipo de participar de forma satisfactoria en la *Robot Soccer World Cup* y contribuir al desarrollo de la Inteligencia Artificial. Todo el trabajo de desarrollo de los robots se puede complementar con actividades docentes y de difusión, además de brindar oportunidades para el desarrollo de temas de investigación aplicada en áreas de automatización, visión por computador, diseño de PCB y mecánico, entre otros.

A partir de las pruebas desarrolladas es posible determinar en primer lugar que el módulo de conversión de voltaje DC-DC boost cumple con los requisitos de diseño establecidos, logrando dimensionar el tamaño y capacidad de una batería óptima, sin embargo, aún falta integrar el circuito al robot tarea en la cual se podrían encontrar problemáticas no previstas.

En segundo lugar, se realizaron las pruebas al módulo flyback sin encontrar resultados satisfactorios en el funcionamiento, sin embargo, durante el proceso de montaje fue posible validar el funcionamiento de cada una de las etapas de montaje convirtiéndose en un punto de partida para nuevos intentos. Se realizó la compra de nuevos componentes para reemplazar aquellos que fallaron, pero a causa del contexto sanitario del país, no pudieron ser desarrolladas a tiempo para ser

incluidas en este trabajo.

Finalmente se puede concluir que el concepto de este trabajo de memoria es viable, ya que es factible la construcción de un convertidor boost capaz de reemplazar a la batería actual del robot por una de menor tamaño y de capacidad justa para que funcione medio tiempo de un partido, puliendo el diseño y construcción del convertidor flyback o probando nuevas topologías se podrá obtener mejores resultados para poder cumplir con los requisitos de diseño del Sysmic, entendiendo que este módulo cumple un rol fundamental en el funcionamiento de cada robot.

4.2. Trabajo futuro

Como trabajo futuro se propone el análisis de valores que para este trabajo de memoria se tomaron en cuenta como requisitos de diseño sin un mayor análisis previo, por ejemplo, el voltaje de carga del banco de condensadores, diseño del solenoide y composición del eje del solenoide.

Además, de diseñar e implementar una placa de circuito que integre ambos convertidores, o bien, integrar el convertidor boost a la batería seleccionada y diseñar una PCB del flyback que se adecue a las disponibilidades de espacio del cada robot.

4.2.1. Robots y otras mejoras

El objetivo de Sysmic Robotics es apuntar a una mejora continua de todos los desarrollos que se llevan a cabo para la construcción del robot, en el ámbito del área de hardware, se espera poder determinar el voltaje efectivo al cual se debe cargar el banco de condensadores y esto se espera conseguir con un set de pruebas para determinar que voltaje es el adecuado para patear la pelota a la velocidad máxima permitida por la organización de la competencia, y porque no, desarrollar un convertidor DC-DC de voltaje variable que permita diferenciar entre tiros al arco (de mayor potencia) y pases entre robot que no requiere patear con toda la energía disponible.

Otra mejora que se desea implementar en una próxima versión, es la utilización de dos solenoides para lograr diferentes tiros, uno de ellos sería el que se desarrolló en este trabajo, patear de forma recta y a nivel del suelo; otro tipo de pateo que no se ha considerado es el tipo "globito" permitiendo realizar habilitaciones de otros robots con pases aéreos. Más allá de un desafío para el área de hardware en el diseño de los circuitos y fabricación de las PCB, requiere de los esfuerzos de otras áreas de trabajo como la de informática/visión que tendría que ser capaz de interpretar la trayectoria y así poder determinar el punto donde interceptar la pelota que viene en el aire. Y al área de firmware que se debe encargarse de interpretar las señales del computador central y generar los vectores de velocidad para cada una de las ruedas y permitir que el robot pueda interceptar la pelota. Todo lo anterior se combina con el diseño mecánico del robot.

Se quiere evidenciar el trabajo multidisciplinario que se desarrolla en Sysmic Robotics y la forma en como se abordan los nuevos desafíos, la búsqueda continua de integrantes que puedan dar continuidad a este proyecto y el apoyo incondicional de departamentos de la universidad y docentes dispuestos a colaborar en la búsqueda de nuevo conocimientos.

Bibliografía

- [1] Goodfellow, Ian and Bengio, Yoshua and Courville, Aaron. *Deep learning*. MIT press, 2016.
- [2] Chen, Chi-hau. *Handbook of pattern recognition and computer vision*. World Scientific, 2015.
- [3] Ned Mohan, Tore M. Undeland and William P. Robbins. *ELECTRÓNICA DE POTENCIA 3ed*. Mc Graw Hill, 2009.
- [4] Muhammad H. Rashid. *Circuitos, dispositivos y aplicaciones 2ed*. PRETICE HALL HISPA-NOAMERICANA, S.A, 1995.
- [5] Equipo Sysmic Robotics USM. *Team Description Paper for RoboCup 2020*. UTFSM, 2020.
https://ssl.robocup.org/wp-content/uploads/2020/03/2020_TDP_Sysmic.pdf
- [6] LINEAR TECHNOLOGY. *High Voltage Capacitor Charger Controller with Regulation*. ANALOG DEVICES.
<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/lt3751.pdf>
- [7] Texas Instruments. *LM3478 High-Efficiency Low-Side N-Channel Controller for Switching Regulator*. TI, 2000.
<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm3478.pdf?HQS=dis-dk-null-digikeymode-dsf-pf-null-ww&ts=1614739799126>

- [8] ANALOG DEVICES. *1kV RMS Quad-Channel Digital Isolators*. 2009-2015.
https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADuM7440_7441_7442.pdf
- [9] RoboCup Federation. *A Brief History of RoboCup*. 2016.
https://www.robocup.org/a_brief_history_of_robocup
- [10] Texas Instruments. *Webench Power Designer*. TI, 1995-2021.
<https://webench.ti.com/power-designer/>