

# Construcción de un convertidor CC-CC tipo reductor orientado a la enseñanza

Andrés Felipe Delgado Flórez

Ingeniería Electrónica  
Facultad de Ingenierías  
Universidad Tecnológica de Pereira  
Colombia

# Construcción de un convertidor CC-CC tipo reductor orientado a la enseñanza

Andrés Felipe Delgado Flórez

Proyecto de grado presentado como requisito para optar al título de  
Ingeniero Electrónico

Director. M Sc Jesser James Marulanda Durango

Ingeniería Electrónica  
Facultad de Ingenierías  
Universidad Tecnológica de Pereira  
Colombia

Nota de aceptación:

-----  
-----  
-----  
-----  
-----  
-----

-----

Director. M Sc Jesser James Marulanda Durango

Pereira, 14 de Julio de 2016

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco primordialmente a mi madre por darme la vida y por ser quién me ha apoyado a través de ella, al profesor Jesser Marulanda por proponer este trabajo de grado y guiarme en la materia de electrónica de potencia, a los profesores que a lo largo de la vida universitaria se esfuerzan por enseñar adecuadamente, a Sheiner Sánchez por siempre brindar su conocimiento y su ayuda a la hora de desarrollar trabajos electrónicos y por último a Daniela Peláez Panesso por compartir su experiencia en el campo de la electrónica y por su colaboración a lo largo del desarrollo de este proyecto.

## RESUMEN

Luego de tener claro el objetivo de lo que se iba a desarrollar, se recopiló información para fortalecer la teoría del proyecto, con esta se pasó a diseñar el circuito Buck matemáticamente teniendo en cuenta los parámetros finales deseados, con esto se hizo un proceso de validación mediante tomas de datos en los laboratorios y simulaciones las cuales arrojaron resultados satisfactorios.

Tomando como referencia trabajos pasados se decidió cual era el driver más adecuado para manejar el convertidor el cual fue probado en el laboratorio dando los resultados esperados. Paralelamente se desarrolló el PWM para proporcionar la señal de entrada del driver y la salida del Buck.

Finalmente se construyeron los circuitos impresos con los cuales se tomó datos y se compararon con los simulados.

# Índice general

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>9</b>
1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA . . . . .	9
2. JUSTIFICACIÓN . . . . .	10
3. OBJETIVOS . . . . .	11
3.1. OBJETIVO GENERAL . . . . .	11
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS . . . . .	11
4. MARCO DE REFERENCIA . . . . .	12
4.1. Marco teórico . . . . .	12
4.1.1. PWM . . . . .	12
4.1.2. Convertidor conmutado CC-CC tipo reductor (Buck) . . . . .	12
4.1.3. Driver del circuito de potencia . . . . .	18
4.1.4. Construcción de circuitos impresos . . . . .	20
<b>2. DISEÑO METODOLÓGICO PRELIMINAR</b>	<b>21</b>
1. ETAPAS DEL PROYECTO . . . . .	21
1.1. Etapa 1: Estado del arte . . . . .	21
1.2. Etapa 2: Circuito PWM . . . . .	21
1.3. Etapa 3: Circuito convertidor reductor . . . . .	21
1.4. Etapa 4: Construcción del módulo . . . . .	21
1.5. Etapa 5: Análisis de resultados . . . . .	22
1.6. Etapa 6: Puesta a punto . . . . .	22
1.7. Etapa 7: Documento . . . . .	22
<b>3. DESARROLLO DEL PROYECTO</b>	<b>23</b>
1. CIRCUITO PWM . . . . .	23
2. CIRCUITO CONVERTIDOR CC-CC TIPO REDUCTOR (BUCK) . . . . .	29
3. RECURSOS DISPONIBLES . . . . .	34
3.1. Materiales . . . . .	34
3.2. Institucionales . . . . .	34
<b>4. ANÁLISIS DE RESULTADOS</b>	<b>35</b>
<b>5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>39</b>
1. CONCLUSIONES . . . . .	39
2. RECOMENDACIONES . . . . .	40
<b>Bibliografía</b>	<b>40</b>

# Índice de figuras

1.1.	Variación del ciclo de trabajo de una señal PWM . . . . .	12
1.2.	Circuito convertidor reductor . . . . .	13
1.3.	Circuito con el interruptor abierto y cerrado. (a) Estado ON. (b) Estado OFF . . . . .	14
1.4.	Gráfica del ciclo de trabajo del PWM con periodo $T_c$ . . . . .	14
1.5.	Corriente en el inductor, diodo e interruptor en modo continuo . . . . .	15
1.6.	Comportamiento del voltaje y la corriente en modo continuo . . . . .	16
1.7.	Comportamiento del voltaje y la corriente en modo discontinuo . . . . .	17
1.8.	Corriente en el inductor, diodo e interruptor en el modo discontinuo . . . . .	18
1.9.	Diagrama de terminales del driver IR2110 . . . . .	19
1.10.	Bomba de carga . . . . .	19
3.1.	Diagrama de terminales del integrado SG3524 . . . . .	23
3.2.	Gráfica de frecuencia vs resistencia del SG3524 . . . . .	24
3.3.	Circuito PWM con ciclo de trabajo y frecuencia variable . . . . .	24
3.4.	Diagrama esquemático del circuito PWM . . . . .	25
3.5.	Diseño de la PCB del circuito PWM . . . . .	26
3.6.	Módulo del circuito PWM . . . . .	26
3.7.	Señal PWM de 100KHz a 25 % de su ciclo de trabajo entre 0,4V - 5V . . . . .	27
3.8.	Señal PWM de 100KHz a 50 % de su ciclo de trabajo entre 0,4V - 5V . . . . .	27
3.9.	Señal PWM de 70KHz a 47 % de su ciclo de trabajo entre 0,4V - 5V . . . . .	28
3.10.	Señal PWM (amarilla) y señal de salida del driver al mosfet (azul) . . . . .	30
3.11.	Diagrama esquemático del circuito convertidor Buck . . . . .	31
3.12.	Diseño de la PCB del circuito Buck . . . . .	32
3.13.	Módulo del circuito Buck . . . . .	33
4.1.	Diagrama de bloques del circuito Buck en Simulink . . . . .	37
4.2.	Voltaje simulado en el inductor . . . . .	37
4.3.	Voltaje práctico en el inductor . . . . .	38

# Índice de cuadros

3.1. Tabla de rangos mínimos y máximos prácticos de operación del circuito Buck . . . . .	29
3.2. Costos de materiales . . . . .	34
4.1. Datos prácticos vs datos simulados de voltaje con la resistencia de $10\Omega$ . . . . .	35
4.2. Datos prácticos vs datos simulados de voltaje con la resistencia de $38\Omega$ . . . . .	36
4.3. Datos prácticos vs datos simulados de voltaje con la resistencia de $38\Omega$ y frecuencia de $70\text{KHz}$ . . . . .	36



# Capítulo 1

## INTRODUCCIÓN

Los circuitos convertidores en el mundo de la electrónica son continuamente usados debido a que sus características los hacen atractivos y su funcionamiento no es complicado. Generalmente son usados como reguladores de tensión ya que existen diferentes configuraciones para modificar su comportamiento según se desee, también permiten controlar la potencia, manejar una mayor seguridad y tener una eficiencia muy alta en comparación con otros tipos de circuitos [1].

Aprender a manejar estas topologías es importante para cualquier estudiante de electrónica, por esto, la construcción de un módulo que permita un estudio más profundo es importante para facilitar la comprensión de conceptos mediante la relación de la teoría con la práctica.

### 1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Realizar el pregrado de una ingeniería comprende estudiar una gran cantidad de temas y asignaturas diferentes, esto deriva mucho conocimiento al cual se busca poner en práctica en todo momento.

Se cuenta con un laboratorio que tiene un amplio abastecimiento de componentes electrónicos y dispositivos enfocados a diferentes campos como comunicaciones, programación, diseño, entre otros. Existen distintos módulos que permiten un estudio más profundo de ciertos postulados teóricos que son tratados en las diferentes materias, pero desafortunadamente no todas las asignaturas cuentan con estas ayudas, en otras palabras, los recursos disponibles no son suficientes y la falta de elementos didácticos en el laboratorio dificulta el entendimiento del comportamiento real tanto de circuitos como de fenómenos analizados.

Un caso particular se presenta en la asignatura Electrónica de potencia, donde se analizan distintas topologías de circuitos convertidores con diferentes características y para diferentes fines. Los componentes existentes en el laboratorio no son suficientes para recrear dichos circuitos de forma satisfactoria y esto requiere invertir tiempo en su construcción.

Debido a lo anterior se puede formular la siguiente pregunta de investigación que define el problema: ¿Existe una forma para que por medio de un módulo de experimentación se facilite el estudio y análisis de los convertidores CC-CC vistos teóricamente en la asignatura de electrónica de potencia?

## 2 JUSTIFICACIÓN

Para los estudiantes de cualquier ingeniería pero particularmente de ingeniería eléctrica y electrónica el uso del laboratorio es fundamental en su desarrollo académico ya que allí se puede analizar los fenómenos y las características de los circuitos y componentes de forma práctica, ya que la teoría, aunque algunas veces, es muy clara es necesario el aprendizaje por medio de situaciones reales. En otras palabras, esto permite consolidar el conocimiento usando la interrelación de la teoría y la práctica, además eleva los estándares en cuanto a la calidad del conocimiento adquirido permitiendo aumentar la capacidad de comprensión de los fenómenos que allí se estén analizando.

La relación teoría-práctica en los procesos de enseñanza-aprendizaje puede ser entendida de diferentes maneras, una muy acertada dice que ambas hacen un aporte significativo a la comprensión del tema tratado [2].

Se propone la construcción de un módulo de experimentación de un convertidor CC-CC<sup>1</sup> reductor, ya que permitirá eliminar el tiempo de conexión de los componentes individuales, además se podrá experimentar teniendo en cuenta las variables de funcionamiento como son: el ciclo de trabajo, frecuencia de conmutación, valores de la carga, etc. Por medio de puntos de medida que se puedan conectar a un osciloscopio para verificar el comportamiento de las variables principales del circuito, en otras palabras, una unidad completa con todas las prestaciones correspondientes al sistema.

Esta idea puede dar paso al desarrollo de nuevos módulos para las prácticas de laboratorio de la asignatura electrónica de potencia, permitiendo así la renovación de las mismas.

---

<sup>1</sup>Corriente Continua

## 3 OBJETIVOS

### 3.1. OBJETIVO GENERAL

Construcción de un módulo convertidor CC-CC tipo reductor orientado a la enseñanza de la asignatura electrónica de potencia.

### 3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Construir un circuito de modulación de ancho de pulso PWM con ciclo de trabajo y frecuencia ajustable.
2. Diseñar el convertidor reductor con diferentes configuraciones posibles para los parámetros del circuito.
3. Implementar el convertidor diseñado, agregando al montaje puntos de medición de voltaje de entrada y salida, frecuencia de conmutación y ciclo de trabajo.
4. Comparar los resultados obtenidos en la práctica con los teóricos o simulados.

## 4 MARCO DE REFERENCIA

### 4.1. Marco teórico

Para el adecuado desarrollo del proyecto es importante realizar un análisis de los diferentes aspectos que intervienen en este trabajo, con el propósito de comprender y obtener buenos resultados.

#### 4.1.1. PWM

PWM<sup>2</sup> o modulación por ancho de pulso, es una técnica de generación de pulsos que generalmente es usada para controlar la energía que se transmite a un dispositivo electrónico por medio de una señal periódica a la cual se varía su ciclo de trabajo. Se caracteriza por ser una señal de onda cuadrada entre 0 y 5 Voltios, aunque puede ser del voltaje que se desee según la aplicación.

El ciclo de trabajo se obtiene comparando una señal triangular con una señal de referencia, la cual define el ancho del pulso según su posición. Como se puede observar en la Imagen 1.1, el ciclo de trabajo o duty cycle va aumentando debido al cambio de magnitud que tiene la señal de referencia confrontada con la señal triangular [3].

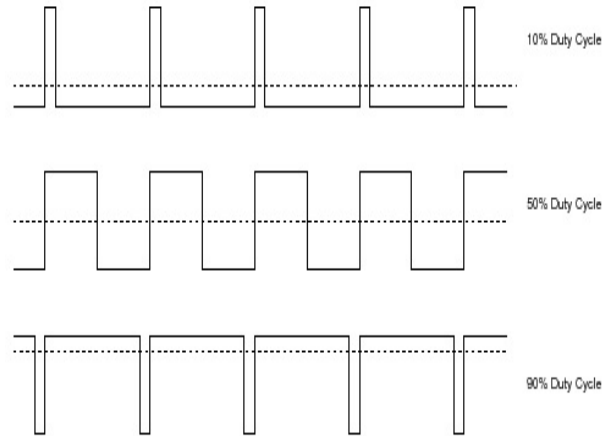


Figura 1.1: Variación del ciclo de trabajo de una señal PWM [4]

Esta técnica es utilizada para transmitir una cantidad específica de energía a un circuito o una carga. El proceso sucede debido a la comparación que se hace entre una señal de referencia y una señal portadora, la cual genera un tren de pulsos al que se le puede variar su ciclo útil por medio de un conversor análogo digital que muestrea la señal de entrada de voltaje [3].

En los circuitos convertidores esta técnica de PWM es utilizada para controlar el tiempo de apertura del elemento conmutador, dejando que la corriente fluya a través del circuito y alimente los componentes.

#### 4.1.2. Convertidor conmutado CC-CC tipo reductor (Buck)

Existen tres tipos de fuentes de alimentación conmutada principales: el boost, el buck y el buck-boost. El primero se encarga de elevar el voltaje de entrada, el segundo se encarga de disminuirlo y el

---

<sup>2</sup>pulse-width modulated

tercero es una mezcla de los dos anteriores. Todas estas configuraciones funcionan de forma no aislada, es decir, comparten una tierra en común y la variación de voltaje de salida depende del ciclo de trabajo aplicado al componente que conmuta [5].

En esta ocasión se trabajó con el reductor de voltaje (Buck), esta configuración es comúnmente usada debido a que el voltaje a la salida es inferior al voltaje de entrada y su eficiencia puede llegar a valores muy altos comparados con la configuración más sencilla que es la del divisor de voltaje, el cual disipa la mayoría de la energía en forma de calor a través de los dispositivos semiconductores [1].

En la Figura 1.2 se puede observar el circuito, el cual está compuesto por:

- Un diodo, este permite que la corriente fluya a través del circuito cuando el interruptor está abierto.
- Un interruptor de alimentación que generalmente es un transistor Mosfet de tipo N.
- Una inductancia y un capacitor, los cuales se encargan de hacer el filtrado de la señal de salida del circuito.
- Una resistencia, que es la carga de la salida en la etapa de potencia [5].

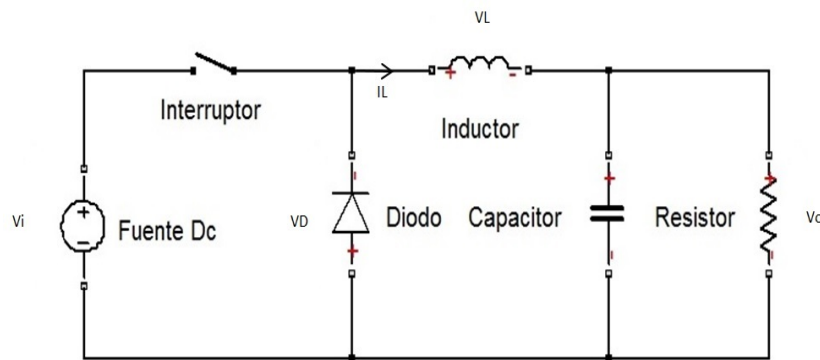


Figura 1.2: Circuito convertidor reductor  
[Del Autor]

### Análisis de estado estable:

El estado estable se puede dividir en dos estados, el estado estable continuo es cuando en todo el tiempo de funcionamiento la corriente que pasa a través de la inductancia es superior a cero, por otra parte el estado estable discontinuo es cuando en el intervalo del ciclo de trabajo la corriente en la inductancia llega a cero, o en otras palabras la inductancia al inicio y al final del ciclo de trabajo tiene una corriente de cero teniendo un intermedio donde la corriente llego al pico máximo [5].

### Análisis de estado estable en modo de conducción continua:

En el modo de conducción continua, el circuito Buck asume dos estados por ciclo de conmutación. El estado encendido (ON), se presenta cuando el interruptor se encuentra cerrado, es decir, está conduciendo y el diodo  $D$  no está en conducción, tal como se muestra en la Figura 1.3(a). el estado apagado (OFF), es cuando el interruptor se encuentra abierto, es decir, el interruptor no está conduciendo y el diodo está conduciendo, tal como se muestra en la Figura 1.3(b).

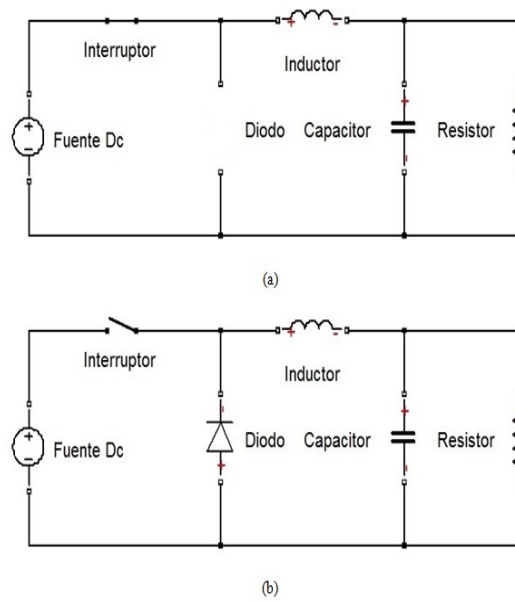


Figura 1.3: Circuito con el interruptor abierto y cerrado. (a) Estado ON. (b) Estado OFF [Del Autor]

El tiempo de encendido es tal como se muestra en la Ecuación 1.1, donde la apertura y cierre del interruptor es definida por el ciclo de trabajo  $D$  y  $T_c$  es la señal periódica.

$$T_{enc} = D * T_c \quad (1.1)$$

Por otra parte el tiempo de apagado está descrito en la Ecuación 1.2.

$$T_{apag} = (1 - D) * T_c \quad (1.2)$$

El ciclo de trabajo es el encargado de determinar el periodo de tiempo en el que se cargará la inductancia, la cual por su parte definirá el modo de operación del convertidor. Como señal de control para el interruptor, que generalmente es un transistor, se usa PWM.

En la Figura 1.4, se muestra la gráfica del tiempo de encendido y apagado según el ciclo de trabajo del PWM.

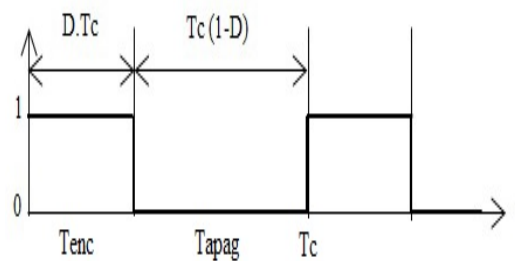


Figura 1.4: Gráfica del ciclo de trabajo del PWM con periodo  $T_c$  [Del Autor]

Refiriéndose a la Figura 1.3 en el estado ON, el interruptor presenta una baja resistencia permitiendo el paso de corriente, esto hace que en el diodo haya polarización inversa de manera que allí no se presenta conducción, así la corriente fluye a través de la inductancia y la combinación de la resistencia de carga y el capacitor. En el estado OFF el interruptor está abierto de manera que no permite el flujo de corriente desde la fuente por su alta impedancia, pero si desde los elementos almacenadores de energía, en este caso la corriente del inductor disminuye hasta el punto donde revierte la polaridad permitiendo que el diodo entre en estado de conducción para así dar paso al flujo de corriente desde la tierra a través de la inductancia y la combinación del capacitor y la resistencia de carga. La Figura 1.5, muestra la corriente (I) en inductor, diodo e interruptor en modo continuo.

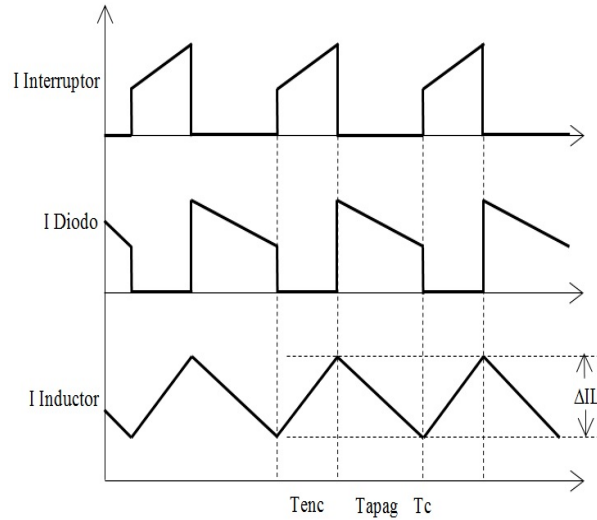


Figura 1.5: Corriente en el inductor, diodo e interruptor en modo continuo  
[Del Autor]

El convertidor está en modo continuo cuando el funcionamiento del circuito no permite que la corriente de la inductancia llegue a cero antes de terminar el ciclo de trabajo, es decir, cuando la señal de control está en estado apagado, la corriente en el inductor disminuye haciendo que el voltaje en el elemento tome un valor negativo teniendo como referencia el voltaje a la salida, tal como se muestra en la Figura 1.6.

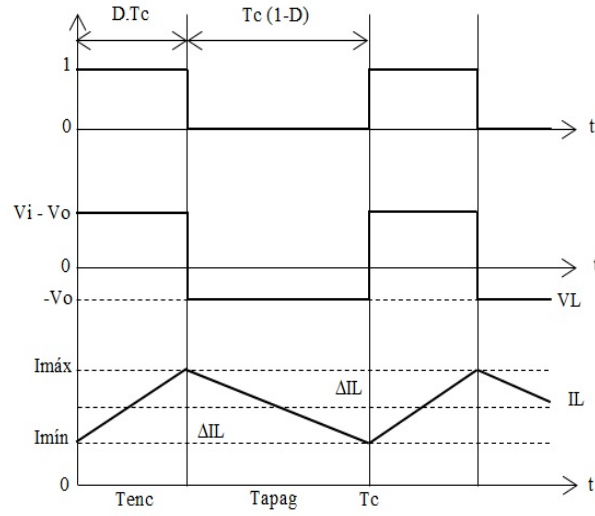


Figura 1.6: Comportamiento del voltaje y la corriente en modo continuo  
[Del Autor]

El diferencial entre la corriente máxima y mínima está dado por la Ecuación 1.3.

$$\Delta IL = \frac{(Vi - Vo)}{L} * D * Tc \quad (1.3)$$

Donde  $Vi$  es el voltaje de entrada,  $Vo$  el voltaje de salida,  $L$  es el valor del inductor,  $D$  es el ciclo de trabajo y  $Tc$  es el periodo.

De la misma manera se pueden hallar los valores de la corriente máxima ( $Imáx$ ) y mínima ( $Imín$ ) de la inductancia, así:

$$Imáx = Vo \left( \frac{1}{R} + \left( \frac{1-D}{2L * fc} \right) \right) \quad (1.4)$$

$$Imín = Vo \left( \frac{1}{R} - \left( \frac{1-D}{2L * fc} \right) \right) \quad (1.5)$$

Donde  $R$  es la resistencia de carga,  $fc$  es la frecuencia de la señal de control.

En la Ecuación 1.3 del diferencial de corriente se asumió que el voltaje de salida no tiene rizado de corriente alterna, esto implica un par de efectos en los cuales se podrá hallar el voltaje de salida. Se asume que el valor del capacitor es suficientemente grande y el cambio de voltaje en él es muy pequeño, por lo tanto es despreciable [5].

La relación de conversión de  $Vo$ , muestra que puede ser ajustada mediante el ciclo de trabajo  $D$  y esta siempre será menor que el valor en la entrada, ya que toma un valor entre 0 y 1. Los valores influyentes en los demás elementos son tan pequeños que pueden ser despreciables. Con esto se obtiene la expresión descrita en la Ecuación 1.6:

$$Vo = D * Vi \quad (1.6)$$



### Análisis de estado estable en modo de conducción discontinuo:

Lo que difiere a este modo del anterior es que la energía almacenada en la inductancia al final del ciclo de trabajo es cero, es decir, la corriente en el inductor es cero en una porción del ciclo de conmutación debido a que la resistencia de carga utiliza la energía almacenada en su totalidad antes de que conmute el interruptor y pase a estado cerrado, tal como se muestra en la Figura 1.7.

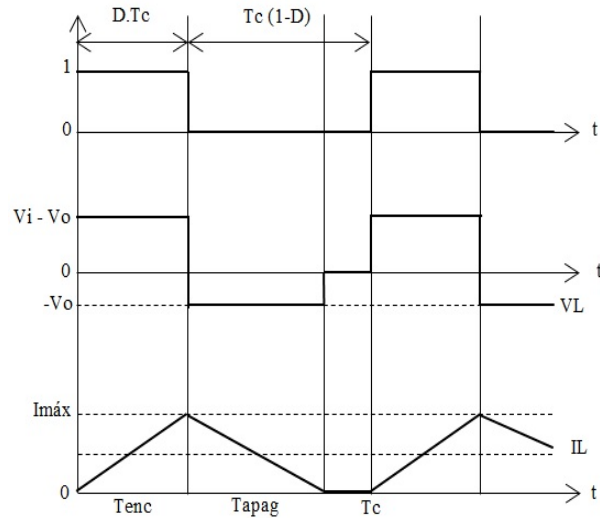


Figura 1.7: Comportamiento del voltaje y la corriente en modo discontinuo  
[Del Autor]

En comparación con el modo continuo, el modo discontinuo tiene tres estados a lo largo del ciclo de conmutación: el primero es cuando el interruptor está en conducción y el diodo está en circuito abierto, el segundo es cuando el interruptor funciona como circuito abierto y el diodo se encuentra en conducción y el tercero es cuando tanto el transistor como el diodo funcionan como un circuito abierto. La Figura 1.8, muestra la corriente (I) en inductor, diodo e interruptor en modo discontinuo.

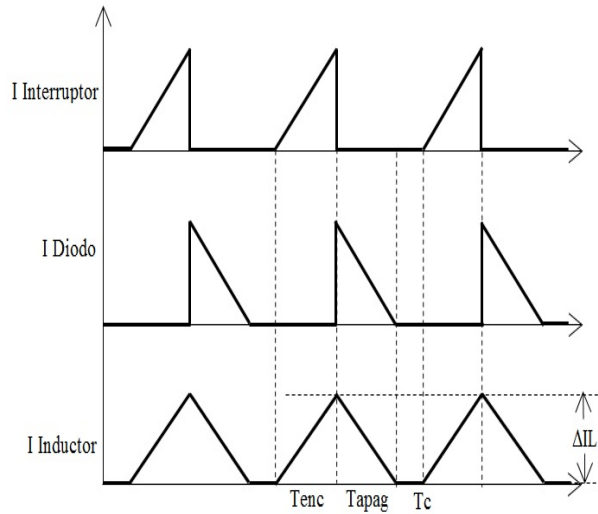


Figura 1.8: Corriente en el inductor, diodo e interruptor en el modo discontinuo  
[Del Autor]

#### Inductancia crítica:

El modo de conducción continuo de una etapa de potencia depende del voltaje de entrada, el voltaje de salida, la salida de corriente, el valor del inductor, la frecuencia del circuito y el ciclo de trabajo. Generalmente estos parámetros se definen en las especificaciones de la etapa de potencia, exceptuando el valor del inductor el cual lo deja como el parámetro de diseño que mantendrá el modo de conducción continua [5].

La Ecuación para hallar el valor mínimo de la inductancia es la siguiente [6]:

$$L_{\text{mín}} = \frac{(1 - D) * R}{2 * f_c} \quad (1.7)$$

#### Capacitancia de salida:

La selección del valor del capacitor de la salida del circuito depende del porcentaje de rizado que se desee en la señal de  $V_o$ , esto teniendo en cuenta de que también sea suficiente para almacenar la cantidad máxima de energía proporcionada por el circuito y de mantener el voltaje constante [5].

La Ecuación para hallar el valor del capacitor es la siguiente [6]:

$$C = \left( \frac{1}{\Delta V} \right) \left( \frac{1}{8f_c} \right) (\Delta IL) \quad (1.8)$$

Donde  $\Delta V$  corresponde al porcentaje de rizado que se desea tener,  $f_c$  es la frecuencia del circuito y  $\Delta IL$  el diferencial de corriente en el inductor.

#### 4.1.3. Driver del circuito de potencia

Debido a las características de los circuitos de potencia, estos necesitan de un driver para mantener la diferencia de potencial necesaria y así hacer conmutar el mosfet, el cual funciona como interruptor, esto con ayuda de un capacitor de bootstrap [7].

En este caso se usó el driver IR2110. Algunas de sus características están descritas a continuación [8]:

- Vcc entre -0,3 V<sub>mín</sub> - 25 V<sub>máx</sub>
- Corriente de 2 A
- Voltaje de salida entre 10 V - 20 V

La Figura 1.9 muestra el driver IR2110 con sus respectivos pines.

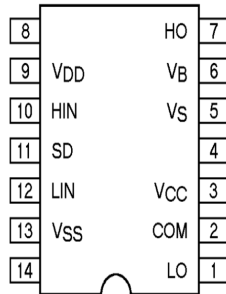


Figura 1.9: Diagrama de terminales del driver IR2110 [8]

### Bomba de carga:

Circuito que utiliza elementos conmutadores para cargar capacitores a voltajes mayores que el de la fuente de alimentación utilizada [9].

El capacitor en la primera etapa se conecta a la alimentación, en la segunda etapa la configuración del circuito cambia poniendo en serie el capacitor y la fuente permitiendo que el voltaje aumente. Tal como se muestra en la Figura 1.10 [10].

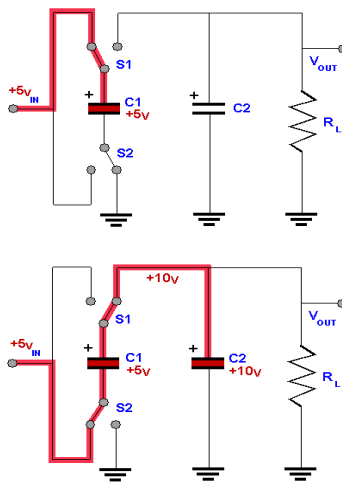


Figura 1.10: Bomba de carga [11]

**Capacitor de Bootstrap:**

Son capacitores que se encargan de mantener el Gate de los transistores a un voltaje superior que el entregado por la fuente de alimentación. Estos se cargan con un voltaje inicial y luego en un momento determinado se eleva con respecto a la referencia [9].

**4.1.4. Construcción de circuitos impresos**

Para el diseño y construcción de los circuitos impresos o PCB se debe tener en cuenta las siguientes recomendaciones [12]:

- El ancho de las pistas depende de la corriente que circule por esta. Sirve para evitar interferencia electromagnética y disipar calor.
- No hacer trazados con ángulo de 90°, siempre hacerlos en un ángulo aproximado de 45°.
- Separar las pistas de acuerdo a la tensión que halla entre ellas.
- El posicionamiento de los componentes antes del proceso de soldadura.
- Se recomienda que la tierra sea un plano sólido de masa, la cual es una superficie de cobre que amplía la tierra del circuito impreso proporcionando una protección contra la interferencia electromagnética [13].
- La etapa de soldadura debe ser iniciada con un precalentamiento del circuito impreso

## Capítulo 2

# DISEÑO METODOLÓGICO PRELIMINAR

## 1 ETAPAS DEL PROYECTO

### 1.1. Etapa 1: Estado del arte

- Estudiar y recopilar el estado del arte de los circuitos convertidores CC-CC y PWM.
- Filtrado y selección de la información.

### 1.2. Etapa 2: Circuito PWM

- Elección de los componentes más adecuados, los cuales cumplan con las características y especificaciones deseadas para el proyecto. Estos componentes deben ser comerciales para tener un fácil acceso a ellos.
- Diseño y construcción del circuito de modulación de ancho de pulso PWM, en el cual el ciclo de trabajo y la frecuencia sean ajustables.

### 1.3. Etapa 3: Circuito convertidor reductor

- Diseñar el circuito reductor partiendo del análisis matemático y así elegir los componentes más adecuados para el convertidor y que sean comerciales.
- Realizar la simulación del circuito convertidor reductor en el software Matlab-Simulink.
- Seleccionar el driver adecuado y su respectiva configuración, el cual permita un buen funcionamiento del circuito reductor.
- Realizar pruebas en el laboratorio y así verificar el correcto funcionamiento del driver.

### 1.4. Etapa 4: Construcción del módulo

- Por medio del software Eagle, realizar el diseño de la PCB del circuito convertidor reductor.
- Construcción física del módulo de experimentación.

### **1.5. Etapa 5: Análisis de resultados**

- Probar en el laboratorio el buen funcionamiento de los circuitos PWM y el convertidor reductor.
- Toma de datos.
- Realizar las respectivas comparaciones de los resultados obtenidos en la simulación con los tomados en el laboratorio.

### **1.6. Etapa 6: Puesta a punto**

- Puesta a punto y entrega final del proyecto.

### **1.7. Etapa 7: Documento**

- Escritura del documento en su respectivo formato siguiendo normas de escritura, pautas y recomendaciones.

## Capítulo 3

# DESARROLLO DEL PROYECTO

Para el desarrollo del trabajo de grado se debe tener en cuenta el diseño del circuito PWM y el diseño del circuito convertidor CC-CC tipo reductor (Buck), los cuales están descritos a continuación:

### 1 CIRCUITO PWM

El circuito de modulación por ancho de pulso se diseñó con la opción de poder variar el ciclo de trabajo y la frecuencia, para este se usó el integrado SG3524, tal como se muestra en la Figura 3.1, este integrado cumple la función de ser un regulador de alimentación, inversor y regulador de conmutación, estas características lo hacen perfecto para trabajar en esta aplicación [14].

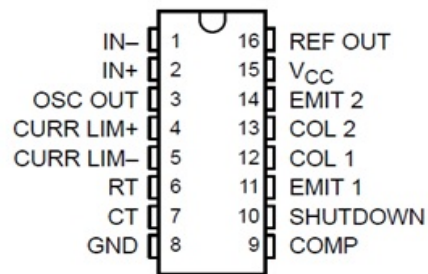


Figura 3.1: Diagrama de terminales del integrado SG3524 [14]

Algunas características del integrado son:

- Voltaje de alimentación de 8 V a 40 V
- Frecuencia mínima de 130 Hz
- Frecuencia máxima de 722 KHz
- Voltaje de salida fijo de 5 V o variable de hasta 40 V
- Limitador de corriente de operación

La frecuencia de operación se calculó según la gráfica descrita en la Figura 3.2.

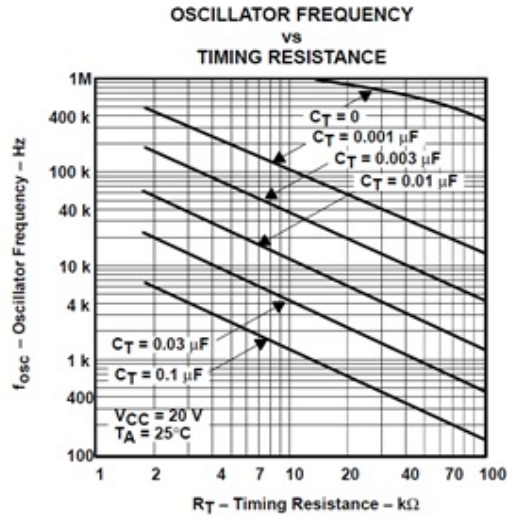


Figura 3.2: Gráfica de frecuencia vs resistencia del SG3524 [14]

La frecuencia depende de los valores de la resistencia  $RT$  y el capacitor  $CT$ , la cual se puede hallar mediante la Ecuación 3.1:

$$f = \frac{1,30}{RT * CT} \quad (3.1)$$

Donde  $f$  esta dada en KHz,  $RT$  en  $K\Omega$  y  $CT$  en  $\mu F$

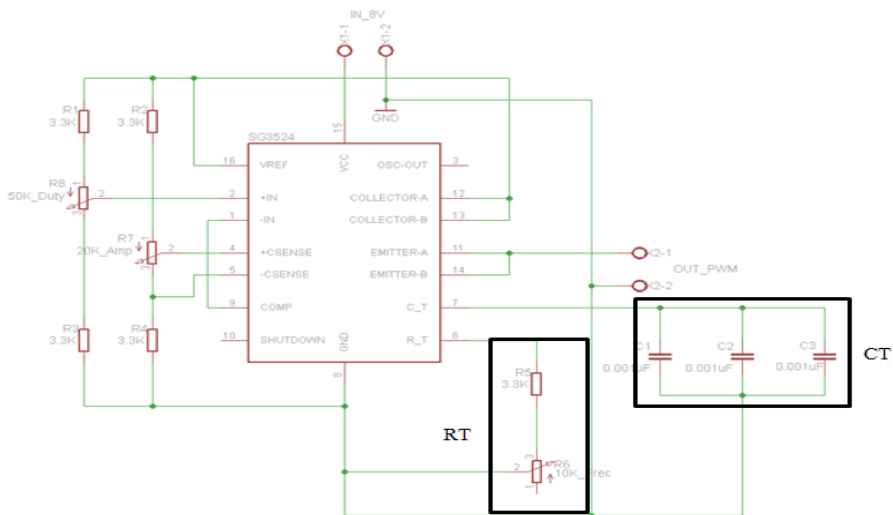


Figura 3.3: Circuito PWM con ciclo de trabajo y frecuencia variable [Del Autor]

Para esta aplicación se utilizó una frecuencia de 100 KHz, analizando la gráfica de la Figura 3.2



el valor del capacitor es de  $0,003 \mu F$ , con estos datos despejamos el valor de la resistencia  $R_T$  de la Ecuación 3.2, así:

$$100KHz = \frac{1,30}{R_T * 0,003\mu F} \quad (3.2)$$

$$R_T = 4333,33\Omega \quad (3.3)$$

Según el resultado anterior se debe tener en cuenta que el valor mínimo del potenciómetro debe ser de  $5K\Omega$  para poder tener la frecuencia deseada. Debido a que uno de los objetivos era obtener un PWM con frecuencia variable se utilizó como  $R_T$  un potenciómetro en serie con una resistencia, con los cuales se pudo obtener un rango de frecuencia entre de  $32KHz$  y  $106KHz$ .

En el caso de  $C_T$  se utilizó una capacitancia de  $0,003\mu F$ , ya que no se encontró una del valor exacto se usaron 3 capacitores de  $0,001\mu F$  para obtener el necesario.

Para el diseño del circuito PWM se realizó un análisis experimental, es decir, los cálculos matemáticos necesarios fueron mínimos y la ubicación de los diferentes componentes no necesito de un análisis de diseño elaborado, ya que se usó una variación del circuito de prueba general facilitado por la disposición de los terminales del integrado y su respectivo funcionamiento.

Este circuito se alimentó con la entrada mínima de  $8V$  en el terminal  $V_{cc}$  (pin 15), al terminal de voltaje de referencia  $V_{ref}$  (pin 16) se conectaron las diferentes resistencias fijas y variables que permiten la variación del ciclo de trabajo en  $+IN$  (pin 2) y los limitadores de corriente  $+C_{sense}$  y  $-C_{sense}$  (pin 4 y pin 5), la interconexión de los terminales  $-IN$  (pin 1) y  $COMP$  (pin 9) permiten compensar la ganancia de la salida del amplificador de error en decibeles [14].

Los terminales colectores (pin 12 y 13) van conectados a  $V_{ref}$  para tener una salida de  $5V$  en las salidas emisoras (pin 11 y 14) cuando los transistores internos den paso a la conducción, tal como se muestra en la Figura 3.4.

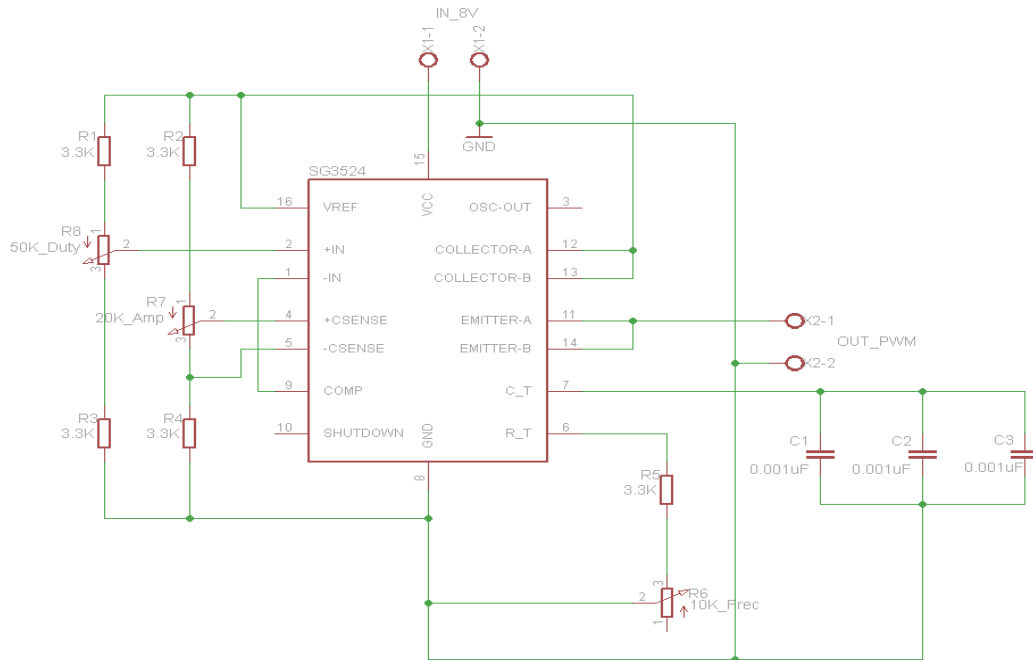


Figura 3.4: Diagrama esquemático del circuito PWM  
[Del Autor]

Luego de tener el diseño del circuito PWM funcionando satisfactoriamente, se dio paso a la creación del circuito impreso usando el software EAGLE. El diseño de la PCB se muestra en la Figura 3.5.

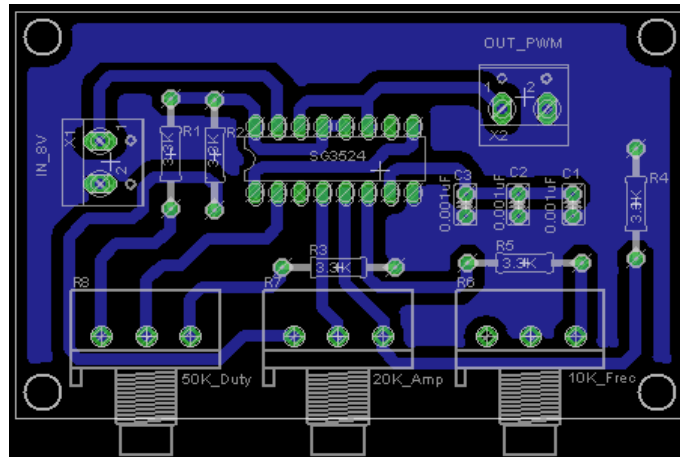


Figura 3.5: Diseño de la PCB del circuito PWM  
[Del Autor]

Este diseño se imprimió sobre la baquela para luego realizar el proceso químico, perforar y soldar los componentes sobre la misma. Finalmente se obtiene el módulo de PWM, tal como se muestra en la Figura 3.6.

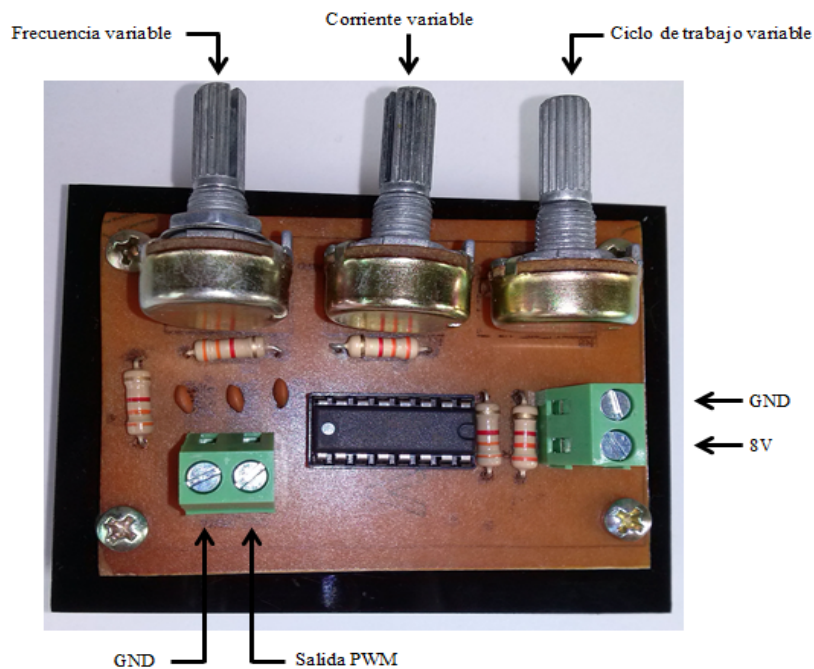


Figura 3.6: Módulo del circuito PWM  
[Del Autor]

Con el circuito impreso se dio paso a las pruebas de funcionamiento de frecuencia y ciclo de trabajo

variable. Tal como se muestra en las Figuras 3.7, 3.8 y 3.9.

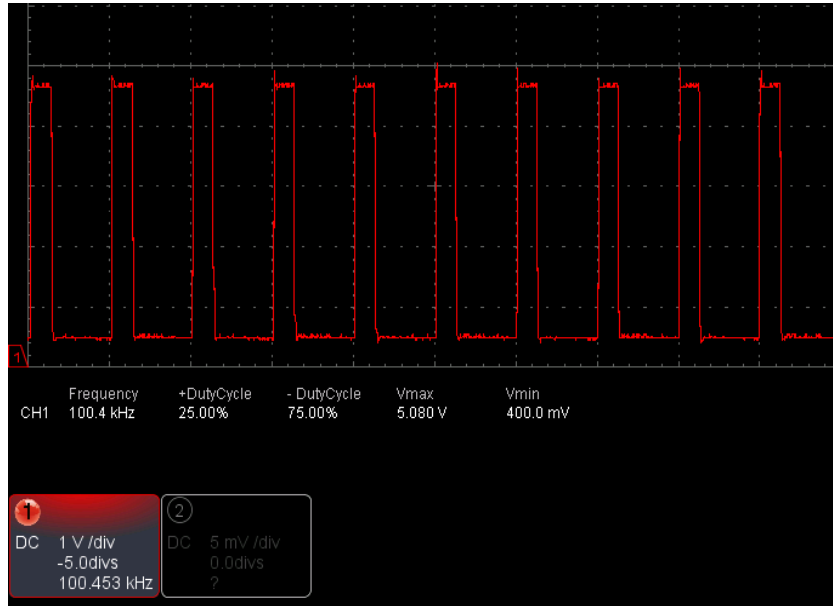


Figura 3.7: Señal PWM de 100KHz a 25% de su ciclo de trabajo entre 0,4V - 5V [Del Autor]

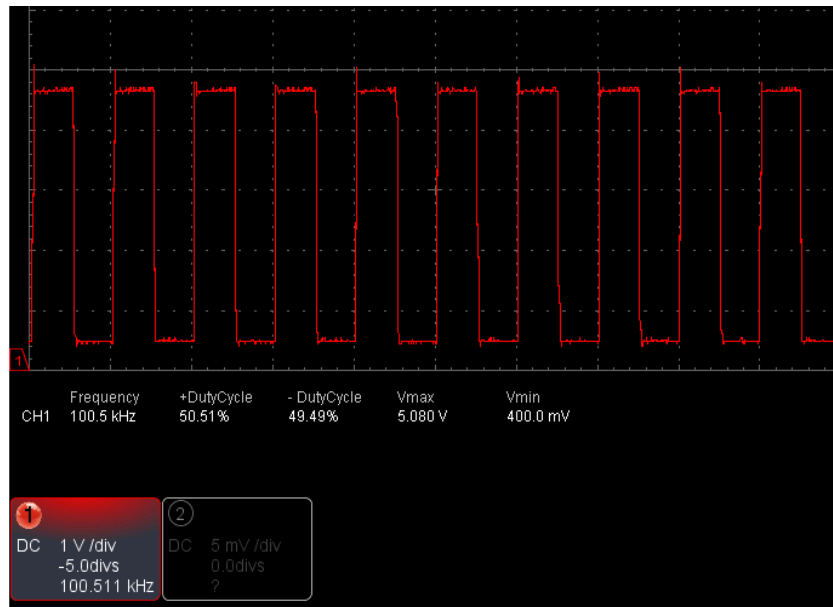


Figura 3.8: Señal PWM de 100KHz a 50% de su ciclo de trabajo entre 0,4V - 5V [Del Autor]

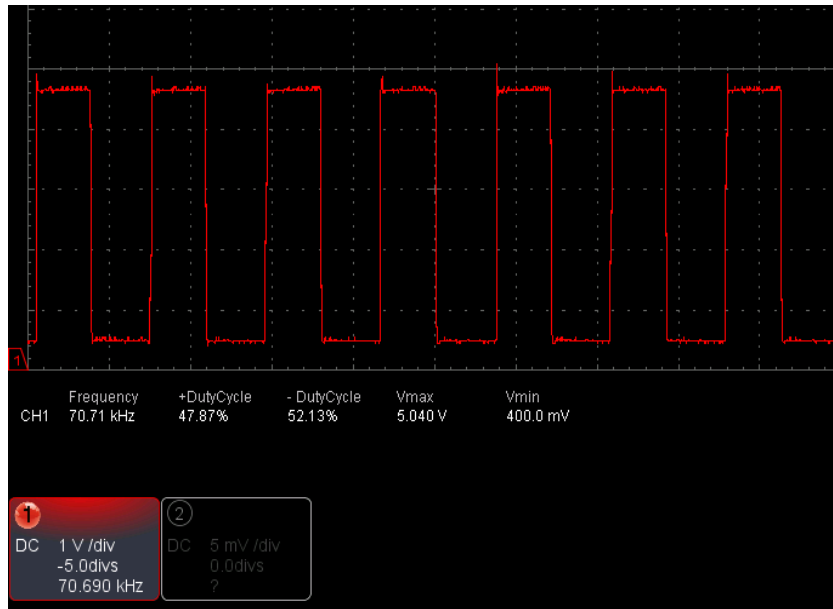


Figura 3.9: Señal PWM de 70KHz a 47 % de su ciclo de trabajo entre 0,4V - 5V  
[Del Autor]

El limitador de corriente se encarga de proteger el integrado limitando la corriente de salida, en este circuito para un buen funcionamiento se debe girar el potenciómetro en el mismo sentido de las agujas del reloj hasta el máximo, lo cual permite que el ciclo de trabajo tenga el rango máximo permitido por los componentes, este rango está entre 0 % y 92 % a una frecuencia de 100KHz y 0 % a 97 % a 33KHz.

## 2 CIRCUITO CONVERTIDOR CC-CC TIPO REDUCTOR (BUCK)

Como idea inicial se tomaron los valores de los componentes de forma experimental, con esto se dio paso a la verificación teórica, validándolos para comprobar si los valores tomados eran los adecuados para la construcción del circuito, todo esto buscando que se mantuviera la característica del modo de conducción continua en la mayoría del ciclo de conmutación.

	Mín	Máx
<b>Resistencia</b>	10Ω	38Ω
<b>Ciclo de trabajo</b>	0%	97%
<b>Frecuencia</b>	32KHz	106KHz
<b>Voltaje de salida</b>	0,003V	19,090V
<b>Corriente en el inductor</b>	0,011A	1,626A

Cuadro 3.1: Tabla de rangos mínimos y máximos prácticos de operación del circuito Buck

Los valores de los componentes que se tomaron para realizar el diseño del circuito fueron:

- Inductor ( $L$ ) = 100 μH
- Capacitor ( $C$ ) = 25 μF
- Resistencias ( $R$ ) = 10 Ω y 38 Ω

La máxima corriente que fluye a través del inductor es cuando  $R = 10 \Omega$ ;  $f = 32 \text{ KHz}$ ;  $D = 0$  y  $V_i = 20 \text{ V}$ , estos valores corresponden a las condiciones críticas.

Teniendo en cuenta la Ecuación 1.4, se encontró:

$$I_{máx} = 20V \left( \frac{1}{10\Omega} + \frac{1}{2} * \frac{(1 - 0)}{100\mu H * 32KHz} \right) \quad (3.4)$$

$$I_{máx} = 5,125A \quad (3.5)$$

La corriente promedio en la inductancia es:

$$I_{Lprom} = \frac{V_i}{R} \quad (3.6)$$

$$I_{Lprom} = \frac{20V}{10\Omega} \quad (3.7)$$

La corriente promedio máxima que se puede obtener en el inductor es de 2 A.

La corriente promedio máxima a través del mosfet se obtiene con un ciclo de trabajo de 1, una resistencia de 10 Ω y su valor es igual a 2 A.

La máxima corriente promedio que puede circular por el diodo es igual a 2 A.

De la misma manera se verificó que cuando se usan ciclos de trabajo superiores a 0,4 utilizando la resistencia de 38 Ω se mantiene el modo de conducción continuo. Para los valores inferiores se hizo el cálculo de la corriente mínima en el inductor y se comprobó el modo de conducción discontinuo.

Teniendo terminado el diseño del circuito Buck, el siguiente paso fue seleccionar el driver y su respectiva configuración, la cual se hizo mediante la experimentación apoyada en la documentación.

El IR2110, es un driver que se encarga de proporcionar las condiciones suficientes y adecuadas para que el mosfet (interruptor) del circuito buck permita la conducción entre el drain y el source.

El circuito Buck se diseñó en dos etapas, las cuales están descritas a continuación:

## Etapa driver

Para ésta etapa, se realizó la siguiente configuración:

La señal de control de PWM ingresa en Hin (pin 10), la etapa encargada de la bomba de carga y el capacitor de bootstrap se alimenta por medio de una señal DC de 15V; esto se protege usando un diodo; todo esto va conectado a Vb (pin 6), por último se tienen los terminales Ho (pin 7) y Vs (pin 5) del driver; el primero es el encargado de ir conectado a el gate del mosfet; no antes sin pasar por una resistencia de  $10\Omega$  encargada de limitar la corriente, luego en Vs (pin 5) tenemos un extremo del capacitor de bootstrap conectado a un nodo donde va el source y este está acompañado de dos componentes también conectados a Ho (pin 7), una resistencia de  $100K\Omega$  encargada de compensar los efectos parásitos entre el gate y el source y también un diodo que se encarga de limitar el voltaje para mantener la diferencia [7].

Se puede observar la configuración sencilla usada en el driver, la cual se verificó en el laboratorio donde arrojó los resultados esperados. Este driver se alimentó con 5V, para esto se usó un L7805 que es utilizado como un regulador de voltaje positivo. La Figura 3.10, muestra la comprobación de la señal PWM a la salida del driver.

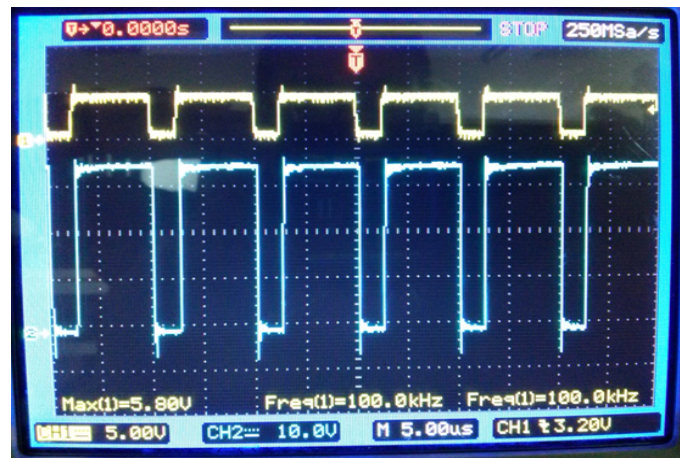


Figura 3.10: Señal PWM (amarilla) y señal de salida del driver al mosfet (azul)  
[Del Autor]

## Etapa de potencia

En esta etapa, se usó el LM317, el cual se encargó de recibir el voltaje de 20 V de alimentación y dividirlo según se requirió, en este caso se disminuyó a 15 V para alimentar el terminal de Vcc del driver.

La etapa de potencia del circuito Buck está conformada por los siguientes componentes:

- Transistor Mosfet IRF640, el cual funciona como interruptor. Se escogió este mosfet ya que maneja una corriente máxima de 18 A y una frecuencia de 1 MHz [15].
- Dos capacitores de 12.5  $\mu\text{F}$  conectados en paralelo para sumar 25  $\mu\text{F}$ , estos manejan un voltaje máximo de 250 V cada uno.
- Inductor de 100  $\mu\text{H}$ . Su corriente máxima es de 5 A.
- MBR20100CT, el cual funciona como diodo de caída libre para dar un camino a la corriente. Esta referencia se eligió ya que una de sus características es que soporta frecuencias altas mayores a 1 MHz, en otras palabras este es un diodo ultrarápido, otra característica importante es que soporta como máximo 20 A [16].
- Dos resistencias cerámicas de potencia, las cuales están conectadas a un interruptor para poder conmutar entre una y la otra y así tener dos configuraciones diferentes para los parámetros del circuito.

Además de lo anterior, se agregaron varios puntos de medida: uno para medir el voltaje de salida, otro para medir la corriente en el inductor y finalmente un punto para medir el voltaje en el inductor. El diagrama del circuito convertidor Buck se muestra en la Figura 3.11.

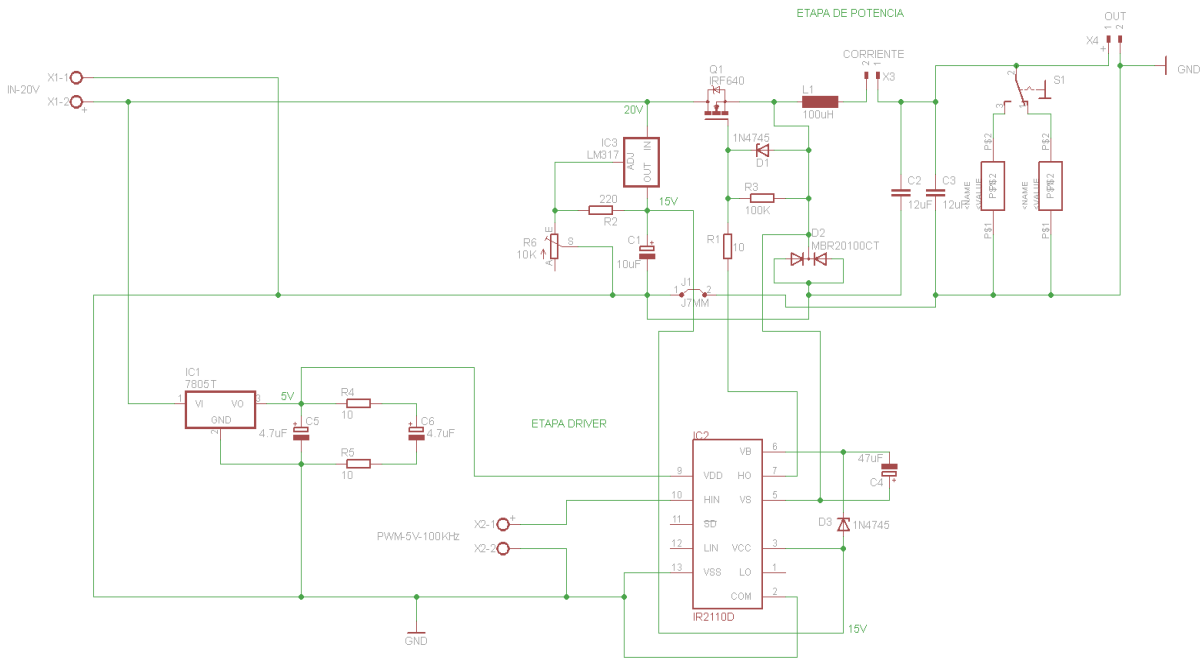


Figura 3.11: Diagrama esquemático del circuito convertidor Buck [Del Autor]

El circuito convertidor buck se puede dividir en 4 partes:

1. Regulador de 15 voltios: esta etapa está conformada por un circuito sencillo que se encarga de tomar los 20 voltios de entrada y por medio de un LM317 reducirlos hasta lograr 15 voltios con los cuales se alimenta el Vcc del driver y el capacitor de bootstrap.
2. Regulador de 5 voltios: allí de la misma manera que en la etapa anterior se toman los 20 voltios de la entrada pero esta vez se reducen hasta 5 voltios los cuales se encargan de alimentar el Vdd del driver IR2110, esto usando un regulador L7805.
3. Etapa driver: en esta etapa se ajusta la señal PWM que va al interruptor del convertidor para que la conmutación de ese componente sea adecuada y permita el correcto funcionamiento del buck. Al interior del integrado IR2110 que es el que actúa como driver se encuentra un circuito de bomba de carga el cual interactúa con el capacitor de bootstrap.
4. Convertidor Buck: esta es la parte esencial del proyecto, compuesto por sus componentes básicos interruptor (Mosfet), inductor, diodo, dos capacitores en paralelo para lograr el valor deseado y dos resistencias de carga las cuales cumplen el objetivo de proporcionar un cambio en los parámetros del circuito según como el usuario requiera por medio de un switch.

Luego de tener el diseño del circuito Buck funcionando satisfactoriamente se dio paso a la creación del circuito impreso usando el software EAGLE. El diseño de la PCB se muestra en la Figura 3.12.

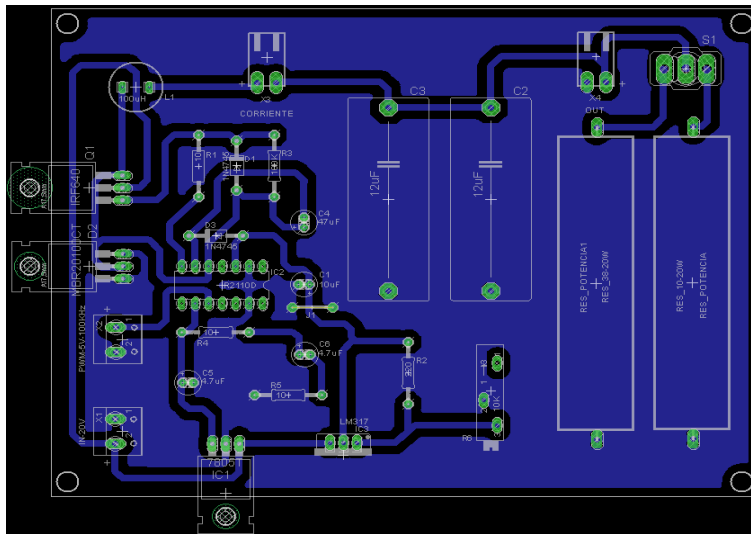


Figura 3.12: Diseño de la PCB del circuito Buck  
[Del Autor]

Este diseño se imprimió sobre la baquela para luego realizar el proceso químico, perforar y soldar los componentes sobre la misma. Finalmente se obtiene el módulo del circuito Buck, tal como se muestra en la Figura 3.13.



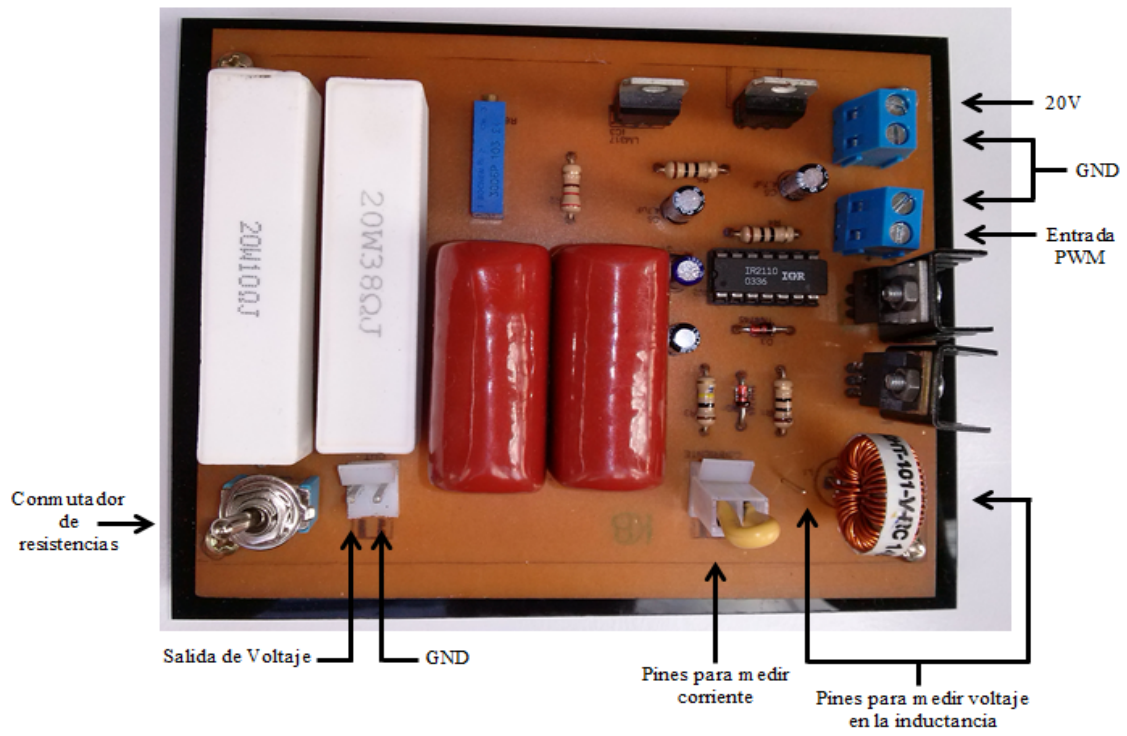


Figura 3.13: Módulo del circuito Buck  
[Del Autor]

### 3 RECURSOS DISPONIBLES

#### 3.1. Materiales

El presupuesto de los materiales del proyecto se muestra en el Cuadro 3.2.

Nota: algunos de los componentes se compraron en pares por si se llegasen a requerir en algún momento, ya sea por que presentaran un defecto de fábrica o se quemaran durante las pruebas en el circuito.

Ítem	Sistema	Descripción	Cantidad	Valor Unitario	Valor Total
1	PWM	Potenciómetro 10K $\Omega$	2	\$ 1.200	\$ 2.400
2		Potenciómetro 20K $\Omega$	2	\$ 1.200	\$ 2.400
3		Potenciómetro 50K $\Omega$	1	\$ 1.200	\$ 1.200
4		Resistencia 3,3K $\Omega$	5	\$ 100	\$ 500
5		Capacitor 0,001 $\mu$ F	6	\$ 100	\$ 600
6		Circuito integrado SG3524	2	\$ 4.000	\$ 8.000
7		Conector	2	\$ 500	\$ 1.000
8		Baquela	1	\$ 4.500	\$ 4.500
9		Tornillos y tuercas	8	\$ 1.500	\$ 12.000
10		Base en acrílico	1	\$ 10.000	\$ 10.000
11		Ácido férrico	1	\$ 2.500	\$ 2.500
12		Estaño	1	\$ 2.000	\$ 2.000
13					
14	BUCK	Trimmer 10K $\Omega$	2	\$ 2.000	\$ 4.000
15		Resistencia 10 $\Omega$	3	\$ 100	\$ 300
16		Resistencia 220 $\Omega$	2	\$ 100	\$ 200
17		Resistencia 100K $\Omega$	2	\$ 100	\$ 200
18		Resistencias de potencia 10 $\Omega$ 20W	1	\$ 3.000	\$ 3.000
19		Resistencias de potencia 38 $\Omega$ 20W	1	\$ 3.000	\$ 3.000
20		Diodo Zener 1N4745	4	\$ 400	\$ 1.600
21		Capacitor 4,7 $\mu$ F	4	\$ 400	\$ 1.600
22		Capacitor 10 $\mu$ F	3	\$ 400	\$ 1.200
23		Capacitor 12,5 $\mu$ F	2	\$ 6.000	\$ 12.000
24		Capacitor 47 $\mu$ F	3	\$ 400	\$ 1.200
25		Regulador LM317	2	\$ 2.000	\$ 4.000
26		Regulador L7805	2	\$ 2.000	\$ 4.000
27		Diodo de barrera schottky MBR20100CT	1	\$ 7.000	\$ 7.000
28		Mosfet IRF640	2	\$ 3.000	\$ 6.000
29		Inductor 100 $\mu$ H	2	\$ 10.000	\$ 20.000
30		Circuito integrado IR2110	2	\$ 9.000	\$ 18.000
31		Conector	2	\$ 500	\$ 1.000
32		Interruptor	1	\$ 2.500	\$ 2.500
33		Disipadores y tornillos	2	\$ 1.000	\$ 2.000
34		Jumper	3	\$ 600	\$ 1.800
35		Baquela	1	\$ 4.500	\$ 4.500
36		Tornillos y tuercas	4	\$ 1.500	\$ 6.000
37		Base en acrílico	1	\$ 20.000	\$ 20.000
38		Ácido férrico	1	\$ 2.500	\$ 2.500
39		Estaño	1	\$ 2.000	\$ 2.000
40					
41		<b>Total</b>			<b>\$ 176.700</b>

Cuadro 3.2: Costos de materiales

#### 3.2. Institucionales

- Laboratorio de Electrónica de la Universidad Tecnológica de Pereira.

## Capítulo 4

# ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación se pueden observar los resultados obtenidos mediante medición en el laboratorio y simulación, los cuales fueron analizados para hallar el error relativo porcentual. Para este valor de resistencia el modo de operación siempre es continuo, usando una frecuencia de 100KHz.

<b><math>R = 10\Omega; f=100\text{KHz}</math></b>	<b>Datos</b>		<b>Error relativo porcentual de voltaje</b>
	<b>Prácticos</b>	<b>Simulados</b>	
<b>Ciclo de Trabajo (%)</b>	<b>Voltaje (Vo)</b>	<b>Voltaje (Vo)</b>	
0	0,005	0,000	0,000%
5	1,008	1,000	-0,800%
10	1,780	1,998	10,911%
15	2,739	2,995	8,548%
20	3,754	3,992	5,962%
25	4,501	4,988	9,763%
30	5,645	5,982	5,634%
35	6,370	6,976	8,687%
40	7,300	7,968	8,384%
45	8,390	8,959	6,351%
50	9,200	9,949	7,528%
55	10,310	10,940	5,759%
60	11,160	11,930	6,454%
65	12,180	12,910	5,655%
70	13,060	13,900	6,043%
75	14,120	14,890	5,171%
80	14,940	15,870	5,860%
85	16,000	16,860	5,101%
90	17,190	17,840	3,643%

Cuadro 4.1: Datos prácticos vs datos simulados de voltaje con la resistencia de  $10\Omega$

R = 38 ohms; $f=100\text{KHz}$	Datos		Error relativo porcentual de voltaje
	Prácticos	Simulados	
	Voltaje (Vo)	Voltaje (Vo)	
Ciclo de Trabajo (%)			
0	0,024	0,000	0,000%
5	1,310	1,340	2,239%
10	2,457	2,580	4,767%
15	3,756	3,739	-0,455%
20	4,725	4,811	1,788%
25	5,486	5,819	5,723%
30	6,105	6,748	9,529%
35	6,960	7,608	8,517%
40	7,800	8,409	7,242%
45	8,840	9,180	3,704%
50	9,880	10,000	1,200%
55	10,860	10,980	1,093%
60	11,940	11,980	0,334%
65	12,820	12,980	1,233%
70	13,700	13,970	1,933%
75	14,830	14,970	0,935%
80	15,760	15,960	1,253%
85	17,000	16,970	-0,177%
90	18,010	17,960	-0,278%

Cuadro 4.2: Datos prácticos vs datos simulados de voltaje con la resistencia de  $38\Omega$

R = 38 ohms; $f=70\text{KHz}$	Datos		Error relativo porcentual de voltaje
	Prácticos	Simulados	
	Voltaje (Vo)	Voltaje (Vo)	
Ciclo de Trabajo (%)			
0	0,003	0,000	0,000%
5	0,065	1,600	95,938%
10	1,557	3,066	49,217%
15	2,494	4,403	43,357%
20	3,501	5,605	37,538%
25	6,060	6,735	10,022%
30	7,270	7,756	6,266%
35	8,100	8,685	6,736%
40	8,800	9,549	7,844%
45	9,830	10,320	4,748%
50	10,270	11,030	6,890%
55	10,720	11,690	8,298%
60	11,690	12,290	4,882%
65	12,680	12,990	2,386%
70	13,740	13,980	1,717%
75	14,730	14,590	-0,960%
80	15,770	15,560	-1,350%
85	16,780	16,930	0,886%
90	17,870	17,900	0,168%
95	18,870	18,840	-0,159%
96	19,090	19,190	0,521%

Cuadro 4.3: Datos prácticos vs datos simulados de voltaje con la resistencia de  $38\Omega$  y frecuencia de  $70\text{KHz}$

El diagrama de bloques del circuito Buck en Simulink, se muestra en la Figura 4.1.

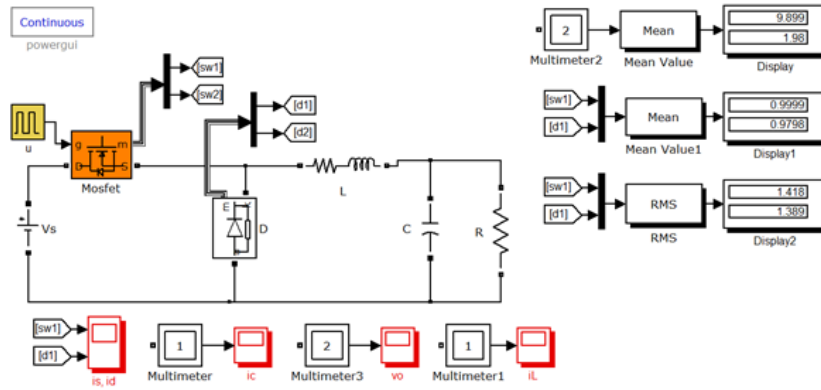


Figura 4.1: Diagrama de bloques del circuito Buck en Simulink  
[Del Autor]

Como una verificación extra se analizó el voltaje en el inductor tanto de forma simulada utilizando el Software Matlab-Simulink como práctica, esto arrojó una señal coherente con la teoría y los cálculos realizados. En las Figuras 4.2 y 4.3 se observan los valores mínimos y máximos que fueron -12V y 8V.

Las variables utilizadas fueron:

$$\begin{aligned}
 V_s &= 20 \text{ V} \\
 D &= 0,6 \\
 L &= 100 \text{ } \mu\text{H} \\
 C &= 25 \text{ } \mu\text{F} \\
 R &= 38 \text{ } \Omega \\
 f &= 100 \text{ KHz}
 \end{aligned}$$

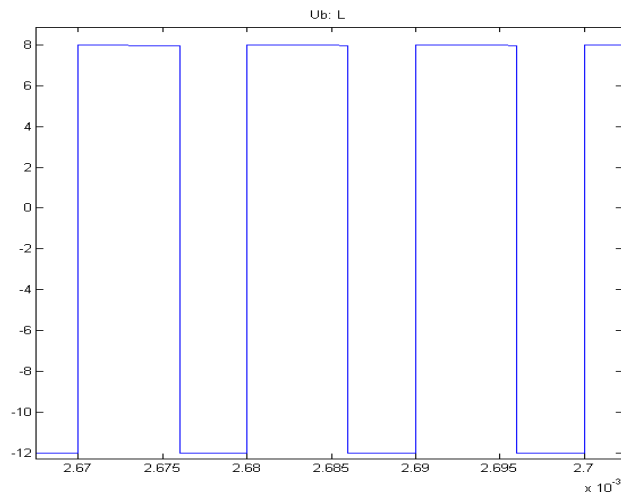


Figura 4.2: Voltaje simulado en el inductor

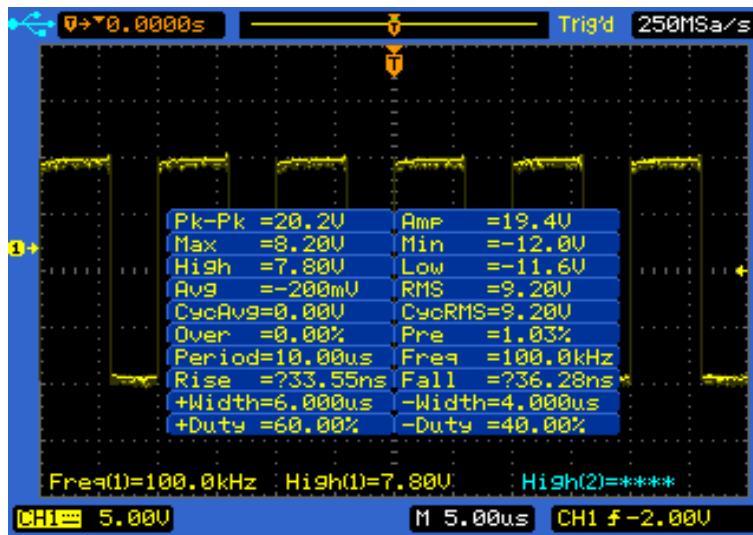


Figura 4.3: Voltaje práctico en el inductor

## Capítulo 5

# CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 1 CONCLUSIONES

1. El ruido que se puede observar en las señales tomadas por el osciloscopio tanto para el PWM como para el circuito Buck o más específicamente la salida del driver se atribuye al mismo equipo de medida, ya que se pudo comprobar que la mayoría de estos no funcionan correctamente en muchas situaciones.
2. El diseño del PWM fue satisfactorio, ya que cumplió con los objetivos planteados de frecuencia y ciclo de trabajo variable.
3. El error presentado en la configuración de la resistencia de  $10\Omega$  puede deberse en gran parte a que al ser un circuito donde había mayor flujo de corriente entre sus componentes permitiera una mayor disipación de la energía. A esta conclusión se llega debido a que se pudo notar que la resistencia de potencia tenía una mayor temperatura mientras trabajaba, comparada con la resistencia de  $38\Omega$  en iguales condiciones.
4. En el circuito de potencia se presenta en casi todo momento una caída de potencial, esto se evidencia al compararlo con el circuito simulado, esto se atribuye a las resistencias parásitas presentadas y a la disipación de la energía en el mosfet.
5. El convertidor funciona con un ciclo de trabajo de 0 a 1, en la práctica se llegó hasta 96 % debido al PWM usado.
6. El porcentaje alto en algunos de los errores se debe a que en la simulación se usaron componentes ideales.
7. El prototipo del convertidor CC-CC tipo reductor (Buck) funcionó correctamente y es válido para estudiar el comportamiento y las características del mismo, ya que los resultados arrojados de forma práctica corresponden a los simulados, esto se puede observar en los porcentajes de error obtenidos en el análisis de resultados.

## 2 RECOMENDACIONES

1. Se recomienda verificar y comparar la forma de onda de la corriente del inductor, ya que debido a la falta de instrumentos de medición no se pudo realizar.
2. Es recomendable tener mucho cuidado en las conexiones de medición al momento de manipular el módulo, ya que la cercanía de los pines para medir el voltaje puede provocar un corto circuito.
3. Tomarse un momento antes de conectar, y así verificar la polaridad de los conectores de alimentación del circuito.
4. Tener en cuenta los rangos críticos de operación para evitar un daño en el circuito.



# Bibliografía

- [1] C. Restrepo, J. Calvente, A. Cid-Pastor, A. E. Aroudi, and R. Giral, "A noninverting buck-boost dc-dc switching converter with high efficiency and wide bandwidth," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 26, pp. 2490–2503, Sept 2011.
- [2] C. Alvarez Alvarez, "La relación teoría-práctica en los procesos de enseñanza-aprendizaje," 2012.
- [3] J. P. Contreras, "Modulación por ancho de pulso (pwm) y modulación vectorial (svm). una introducción a las técnicas de modulación," *El Hombre y la Máquina*, no. 025, pp. 70–83, 2005.
- [4] Best-Microcontroller-Projects, "Pwm pic: Pulse width modulation [en línea]." Disponible en: <<http://www.best-microcontroller-projects.com/pwm-pic.html>>, 2015. [Consulta 20 de Noviembre de 2015].
- [5] T. Instruments, *Understanding Buck Power Stages in Switchmode Power Supplies*, Marzo 1999.
- [6] D. W. Hart, *Electrónica de potencia*. Pearson Educación, SA, 2001.
- [7] H. Ramirez, C. Restrepo, J. Calvente, A. Romero, and R. Giral, "Sistemas de arranque para un convertidor buck-boost en un bus dc," 2012.
- [8] I. Rectifier, *IR2110(-1-2)(S)PbF/IR2113(-1-2)(S)PbF*, 2005. [Datasheet].
- [9] J. M. O. González, *DISEÑO DE UN AMPLIFICADOR DE AUDIO CON EXCURSIÓN DE VOLTAJE MAYOR A LAS FUENTES DE POLARIZACIÓN, UTILIZANDO TÉCNICAS DE MICROELECTRÓNICA*. PhD thesis, Pontificia Universidad Javeriana, 2011.
- [10] G. van Steenwijk, K. Hoen, and H. Wallinga, "Analysis and design of a charge pump circuit for high output current applications," in *Solid-State Circuits Conference, 1993. ESSCIRC '93. Nineteenth European*, vol. 1, pp. 118–121, Sept 1993.
- [11] Y. Dictionary, "Charge pump - computer definition [en línea]." Disponible en: <<http://www.yourdictionary.com/charge-pump>>, 2016. [Consulta 08 de Julio de 2016].
- [12] J. L. Sánchez, F. A. R. Salamanca, C. L. T. Rodríguez, and J. A. G. Moreno, "Recomendaciones para el diseño de circuitos impresos de potencia," *Ingeniería*, vol. 9, no. 2, pp. 44–47, 2003.

- [13] S. Celozzi, G. Panariello, F. Schettino, and L. Verolino, "A general approach for the analysis of finite size pcb ground planes," in *Electromagnetic Compatibility, 2000. IEEE International Symposium on*, vol. 1, pp. 357–362 vol.1, 2000.
- [14] T. Instruments, *SG2524, SG3524 Regulating pulse-width modulators*, 2003. [Datasheet].
- [15] I. Rectifier, *IRF640*. [Datasheet].
- [16] D. Incorporated, *MBR2070CT-MBR20100CT*. [Datasheet].