

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

# CONSTRUCCIÓN DE UN CONVERTIDOR BUCK SÍNCRONO.

Daniel Estrada Velásquez

Programa Académico  
TECNOLOGÍA EN ELECTRÓNICA

Julián Peláez Restrepo

Docente

**INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO**

**Mayo 31 de 2016**

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## RESUMEN

---

Este proyecto tiene como objetivo la construcción de un convertidor Buck síncrono de 200W, para ser implementado en el uso de energías renovables, esto posible gracias los componentes previamente seleccionados para obtener el mejor rendimiento posible, siendo estos los que definen la capacidad máxima del mismo.

Para la construcción fue necesario realizar montajes experimentales, y algunas simulaciones con el fin de obtener el mejor resultado posible, además se realizo el montaje de un circuito PWM a una frecuencia de 100KHz, ya que esta frecuencia de conmutación fue uno de los criterios de diseño para el convertidor Buck síncrono luego se realiza el montaje con el driver IR2110 el cual es el circuito de disparo para los Mosfet.

Con estos elementos se comprueba el funcionamiento de la parte de potencia del convertidor Buck síncrono el cual se implementa en una tarjeta electrónica diseñada con el software Eagle.

Se realizan pruebas de simulación, al igual que se realizan pruebas experimentales del convertidor.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## RECONOCIMIENTOS

---

A los maestros con los que me he encontrado a lo largo de este camino, ya que han sido de quienes fomentan paso a paso el que quiera seguir por este sendero, a las personas que hacen parte del laboratorio ETI del ITM, ya que su información ha sido de gran utilidad durante este proceso.

Al docente Daniel González Montoya. Docente de control, por su colaboración durante el desarrollo de este proyecto.

Al docente y asesor Julian Pelaez Restrepo. Doctor en ingeniería Electrónica (énfasis Electrónica de Potencia). Por la colaboración y disponibilidad para llevar a cabo el desarrollo de este proyecto.

A los compañeros de la universidad que también transitan por este camino y que no flaquean a pesar de todo el trabajo que implica este proceso de aprendizaje.

A mi madre por la paciencia que me ha tenido durante todo este tiempo, por el apoyo brindado.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## ACRÓNIMOS

---

ITM	Instituto Tecnológico Metropolitano.
Lab	Laboratorio.
ETI	Electrónica, Telecomunicaciones e Informática.
R	Resistor.
L	Inductor.
C	Condensador.
V	Voltaje.
A	Amperio.
$\Omega$	Ohmio.
K	Kilo.
G	Giga.
W	Watios.
$\mu$ F	micro Faradio.
$\mu$ H	Micro Henrios.
m $\Omega$	Mili Ohmio.
Hz	Hertz.
KHz	Kilo Hertz.
V <sub>IN</sub>	Voltaje de entrada.
V <sub>OUT</sub>	Voltaje de salida.
I <sub>max</sub>	Corriente máxima.
IC	Circuito integrado.
GS/s	Giga Sample/second o Giga Muestra/segundo.
RL	Resistencia de carga.
ESR	Resistencia serie equivalente.
DCR	Resistencia de corriente directa.
R <sub>DS(ON)</sub>	Resistencia activa entre Surtidor y Drenador.
CMOS	Semiconductor complementario de óxido metálico.
PWM	Modulación por ancho de pulso.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

On	Activado.
Off	Desactivado.
Not	Negación.
T <sub>on</sub>	Tiempo activo.
T <sub>off</sub>	Tiempo Inactivo.
T <sub>Deat</sub>	Tiempo muerto.
Duty cycle	Ciclo útil de trabajo.
DC	Corriente directa.
Mosfet	Transistor de efecto de campo metal-óxido-semiconductor.
PSIM	Software de simulación Powersim.
PCB	Placa de circuito impreso.
EAGLE	Fácilmente aplicable editor de diseño gráfico.
DC	Corriente directa.
EMI	Emisiones electromagnéticas.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN .....	8
2.	MARCO TEÓRICO .....	9
2.1.	El convertidor Buck (Reductor).....	9
2.2.	Ventajas y desventajas. ....	10
2.3.	Aplicaciones. ....	10
2.4.	Funcionamiento.....	10
2.4.1.	Componentes reactivos. ....	10
2.4.2.	Componentes conmutadores. ....	11
2.4.3.	Métodos de conmutación.....	11
3.	METODOLOGÍA.....	12
3.1.	Materiales usados para la construcción. ....	12
3.1.1.	Condensador B32778.....	12
3.1.2.	Inductor 2318-V-RC. ....	12
3.1.3.	Regulador de voltaje “78XX”. ....	13
3.1.4.	Mosfet “IRLZ34N”. ....	13
3.1.5.	Sensor de corriente “INA225”. ....	14
3.1.6.	Driver “IR2110”.....	14
3.1.7.	Generador de señal PWM “SG3524” .....	14
3.1.8.	Compuerta negadora “DC4049”.....	15
3.1.9.	Resistencia shunt “WSR3”. ....	15
3.2.	Equipos. ....	15
3.2.1.	Fuente “BKPRECISION XLN6024”.....	15
3.2.2.	Carga electrónica “BK PRECISION 8502”. ....	16
3.2.3.	Osciloscopio “TEKTRONIX MSO 4034B”.....	16
3.3.	Simulación.....	17
3.3.1.	Simulación en condiciones ideales. ....	17
3.3.2.	Simulación en condiciones reales.....	20
3.4.	Construcción.....	23

 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3.4.1.	Fuente para el control. ....	23
3.4.2.	Generador PWM con el IC SG3524. ....	23
3.4.3.	Driver IR2110. ....	25
3.4.4.	Circuito de potencia.....	26
3.4.5.	Sensor de corriente INA225.....	28
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	30
4.1.	Diseño del PCB. ....	30
4.1.1.	Primera etapa: Diseño del esquemático.....	30
4.1.2.	Segunda etapa: Diseño de la tarjeta electrónica.....	33
4.1.3.	Calculo del ancho de las pistas para la tarjeta electrónica.....	33
4.2.	Resultados experimentales.....	35
5.	CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO .....	41
	REFERENCIAS .....	42
	Referencias Bibliográficas.....	42

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

# 1. INTRODUCCIÓN

---

Cada vez es más evidente que la demanda de energía en el planeta es mayor, las fuentes para obtener esta energía se están agotando o son contaminantes pero de igual forma se siguen utilizando, el uso de energías renovables y la aplicación de la electrónica de potencia son una de las opciones más amigables con el ambiente, ya que a nivel mundial el consumo de energía no renovable está cobrando un alto precio para el planeta. Por ende en la actualidad hay un importante avance en la cantidad de recursos suministrados para el estudio e implementación de las energías renovables como la eólica, solar, hidráulica, energías marinas, geotérmica, bioenergía.

Dicho esto el desarrollo e implementación de convertidores cada vez más eficientes es de gran importancia para el uso de estas energías renovables y su aplicación en la industria tanto como en los hogares.

Donde la electrónica de potencia es aquella que se encarga de estudiar la conversión, el control de la energía eléctrica y sus aplicaciones con el fin de optimizar el rendimiento de esta. Por tal razón en este proyecto se pretende explicar la construcción de un convertidor Buck síncrono en donde se muestran las diferentes etapas que componen el circuito, los diferentes componentes a usar y otras herramientas para su comprensión con ayuda de elementos de medida que hay en el laboratorio.

## 2. MARCO TEÓRICO

La electrónica de potencia es una de las ramas de la electrónica, que estudia el control y conversión de la energía eléctrica, sus aplicaciones; maximizando el rendimiento.

En la década de los 80 hay un cambio en el concepto de conversión y control de la energía eléctrica al concepto de modulación del flujo de la energía utilizando convertidores conmutados, fabricados con componentes semiconductores de potencia los cuales tienen la capacidad de trabajar a altas frecuencias de conmutación, al igual que soportan potencias relativamente elevadas. Los convertidores de energía que se estudian en la electrónica de potencia se denominan convertidores estáticos. (Galera Ortega, 2002,p.12)

Dentro de esta categoría se diferencian varios tipos, de acuerdo al tipo de energía que convierta, según la conversión que se realiza el circuito recibe un nombre característico, pero en este documento nos enfocaremos en el convertidor BUCK.

### 2.1. El convertidor Buck (Reductor).

La función de este convertidor es mantener una tensión de salida inferior a la tensión de entrada y con una corriente alta a la salida, en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se ilustra el circuito de un convertidor Buck asíncrono.

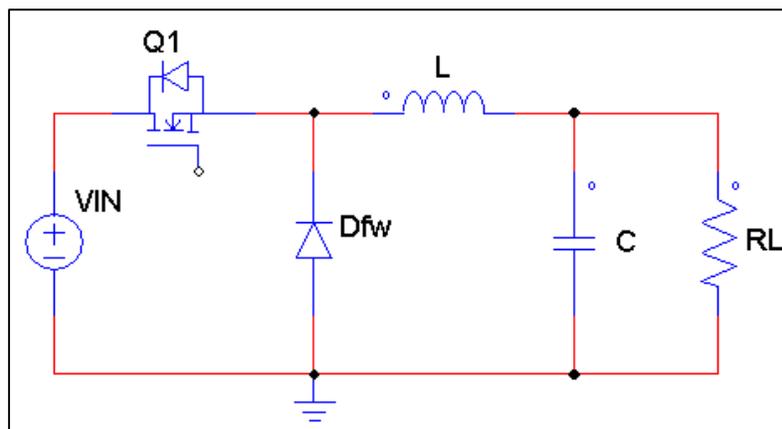


Figura 1. Esquema de un convertidor DC-DC Buck asíncrono.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## 2.2. Ventajas y desventajas.

Cabe mencionar algunas ventajas y desventajas en el uso de los convertidores DC-DC, como reguladores de tensión:

Ventajas.

- La eficiencia del convertidor oscila entre el 60% al 90% en comparación al rendimiento de las fuentes de alimentación lineales que oscila entre el 20% al 10%.
- El tamaño es reducido.

Desventajas.

- Estas fuentes generan emisiones electromagnéticas (EMI).
- En niveles de carga bajos, la eficiencia disminuye a medida que la corriente de reposo del CI del convertidor contribuye significativamente a las pérdidas del sistema.

## 2.3. Aplicaciones.

Las aplicaciones más comunes de este tipo de convertidores en la industria son:

- Controlar motores de DC.
- Fuentes de alta eficiencia y precisión.
- Sistemas de potencia fotovoltaicos.
- Vehículos híbridos.

## 2.4. Funcionamiento.

El principio de funcionamiento para estos convertidores conmutados, es el de almacenamiento y la transferencia de energía por ciclos de conmutación. (Galera Ortega, 2002)

En el primer ciclo de trabajo se almacena energía en la bobina, mientras que en el segundo ciclo de trabajo la energía almacenada en la bobina se transfiere al capacitor.

Hay dos grupos básicos de componentes que presentan un mínimo de pérdida de potencia para su construcción.

### 2.4.1. Componentes reactivos.

Los capacitores y las bobinas. Estos componentes almacenan energía, el capacitor en forma de voltaje y la bobina en forma de campo magnético.

### 2.4.2. Componentes conmutadores.

En condiciones ideales, estos dispositivos tienen un comportamiento de interruptores, es decir, en estado (ON) presentan una tensión en los bornes nula ( $V=0$ ), en estado de corte (OFF) tienen una corriente de paso nula ( $i=0$ ). De esta forma el producto entre  $V \times i = 0$  y no disiparán potencia, dicho esto es importante que la conmutación de dichos componentes sea en intervalos muy pequeños para que la conmutación sea lo más rápida posible y minimizar el rizado durante la conmutación. (Galera Ortega, 2002,p.13)

### 2.4.3. Métodos de conmutación.

Existen muchas técnicas para realizar la conmutación, dos de estas técnicas para regular la salida de un convertidor por conmutación son: El modulador de ancho de pulso o (PWM) y la modulación por frecuencia de pulsos o (PFM).

- En el PWM se modifica el ciclo de trabajo (Duty Cycle) y se mantiene la frecuencia fija, para regular la salida de una fuente de alimentación.
- En la PFM se modifica la frecuencia y se mantiene el ciclo de trabajo constante para lograr la regulación. (digikey, 2016)

En la figura 2 se puede observar el circuito del convertidor Buck síncrono, siendo esta una modificación del convertidor Buck en la cual se reemplaza el diodo por un interruptor controlado, con el fin de mejorar la eficiencia en aplicaciones de bajo voltaje o con el fin de utilizar el convertidor de forma bidireccional.

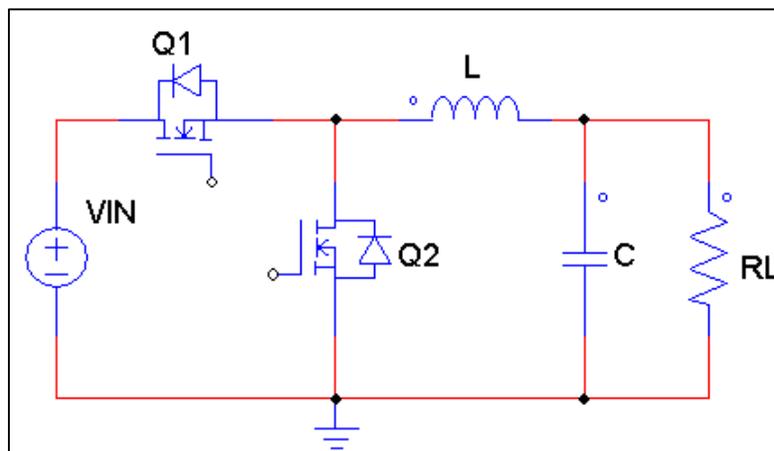


Figura 2. Esquema de un convertidor DC-DC Buck síncrono.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## 3. METODOLOGÍA

---

Para la construcción del convertidor Buck hay que tener presente algunos de los siguientes criterios en el momento de diseñar el circuito: (Tipo de carga, Tensión de entrada, tensión de salida y corriente de salida, frecuencia de operación), ya que es importante conocer qué tipo de función cumplirá para realizar un correcto diseño de este.

El convertidor Buck síncrono (Reductor) de 200W conmuta a una frecuencia de 100 KHz, donde se toma una medida de la corriente en el inductor, los voltajes de entrada y salida.

En esta sección se ilustran los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas con el software PSIM en condiciones ideales y en condiciones reales, se mencionan los componentes que se usan para la construcción del convertidor, al igual que los instrumentos con los que se realizan las pruebas del mismo.

### 3.1. Materiales usados para la construcción.

#### 3.1.1. Condensador B32778.

Es un condensador con una capacitancia de  $22\mu\text{F}$  a 100V que opera a muy altas frecuencias de conmutación ideal para trabajar en convertidores DC – DC.

Para ver el datasheet dar clic [aquí](#).

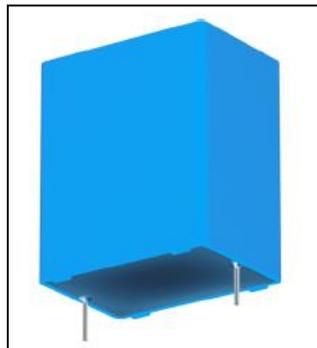


Figura 3. Condensador B32778.

#### 3.1.2. Inductor 2318-V-RC.

Es una bobina con una inductancia de  $330\mu\text{H}$  que por su forma almacena energía en forma de campo magnético. Para ver el datasheet dar clic [aquí](#).

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

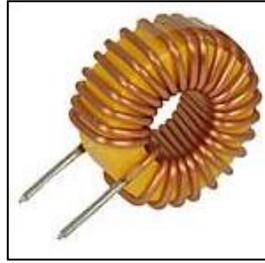


Figura 4. Inductor 2318-V-RC.

### 3.1.3. Regulador de voltaje “78XX”.

Estos son reguladores de tensión monolíticos, en este caso se le da uso al 7805 y 7815 los cuales se están usando para la alimentación del circuito de disparo de los Mosfet y el circuito de acondicionamiento, estos reguladores entregan un nivel de tensión fijo independiente del nivel de tensión en la entrada del dispositivo, este elemento tiene un nivel de tensión máximo al que se debe someter está dado por el fabricante, en nuestro caso es de 35V, la capacidad de corriente máxima es de 1A y su encapsulado es TO-220. Para ver el datasheet dar clic [aquí](#).

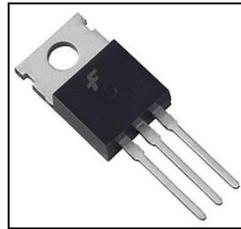


Figura 5. Regulador de voltaje “78XX”.

### 3.1.4. Mosfet “IRLZ34N”.

El encapsulado de este transistor es TO-220 y trabaja a una frecuencia de conmutación de 1.0MHz, soporta una corriente de 29A en uso continuo con un voltaje en la compuerta Gate de 10V, haciendo que este transistor sea ideal para la aplicación en el convertidor Buck. Para ver el datasheet dar clic [aquí](#).

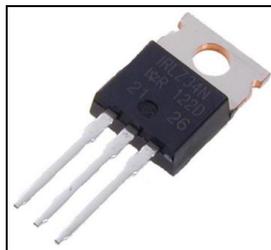


Figura 6. Mosfet “IRLZ34N”.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

### 3.1.5. Sensor de corriente “INA225”.

El encapsulado de este dispositivo es de soldadura superficial (SMD), este circuito integrado es un amplificador operacional que sensa la corriente que circula en el convertidor Buck síncrono por medio de una resistencia shunt. Para ver el datasheet dar clic [aquí](#).



Figura 7. Sensor de corriente “INA225”.

### 3.1.6. Driver “IR2110”.

Con este dispositivo se controla la conmutación de los transistores MOSFET e IGBT haciéndolo ideal para el uso de convertidores DC-DC, cargadores de baterías, control de motores por sus frecuencias de operación tan altas, el voltaje de alimentación máximo de este integrado es de 25V, voltaje de salida se encuentra entre los 10V a 20V y una corriente de 2A. Para ver el datasheet dar clic [aquí](#).



Figura 8. Driver “IR2110”.

### 3.1.7. Generador de señal PWM “SG3524”.

El CI “SG3524” con este dispositivo se genera una señal PWM que opera con frecuencias entre los 130Hz como mínimo y 722 KHz como máximo, la frecuencia de operación generada para este convertidor Buck es de 100KHz, este CI soporta un voltaje de alimentación máximo de 40V. Para ver el datasheet dar clic [aquí](#).

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

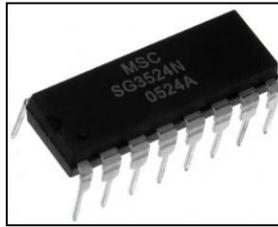


Figura 9. Generador de señal PWM "SG3524".

### 3.1.8. Compuerta negadora "DC4049".

Este CI es un juego de compuertas negadoras, es de tecnología CMOS lo que permite su funcionamiento con voltajes entre 0.5V a 18V, permite trabajar a altas frecuencias. Para ver el datasheet dar clic [aquí](#).

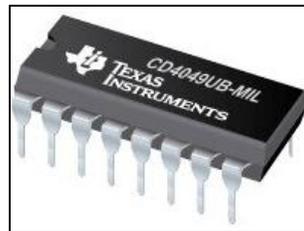


Figura 10. Compuerta negadora "DC4049".

### 3.1.9. Resistencia shunt "WSR3".

Es una resistencia de soldadura superficial (SMD) de muy bajo valor en ohmios y su potencia es de 3W. Para ver el datasheet dar clic [aquí](#).

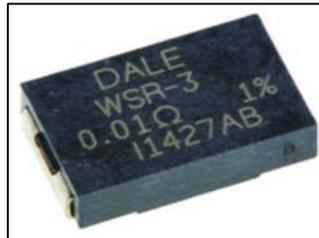


Figura 11. Resistencia Shunt "WSR3".

## 3.2. Equipos.

Estos son los equipos que se utilizaron para realizar pruebas en el convertidor Buck.

### 3.2.1. Fuente "BKPRECISION XLN6024".

Fuente de poder programable de 0V a 60V con una capacidad de entrega de hasta 24A, esta fuente ofrece hasta 1.440W de energía, cuenta con protecciones programables para el voltaje y la corriente.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22



Figura 12. Fuente "BK PRECISION XLN6024".

### 3.2.2. Carga electrónica "BK PRECISION 8502".

Esta carga programable de CD es perfecta para realizar pruebas y evaluar una amplia variedad de fuentes de CC, puede funcionar en modos CC (corriente constante), CV (voltaje constante), CR (resistencia constante) o modo PC (potencia constante), mientras los valores de voltaje, corriente, resistencia y potencia se miden y se muestran en tiempo real.



Figura 13. Carga electrónica "BK PRECISION 8502".

### 3.2.3. Osciloscopio "TEKTRONIX MSO 4034B".

Este osciloscopio ofrece herramientas de múltiples funciones para la depuración de señales mixtas, ofrece hasta 1 GHz de ancho de banda y 5 GS/s (Giga Sample/second) de velocidad de muestreo.

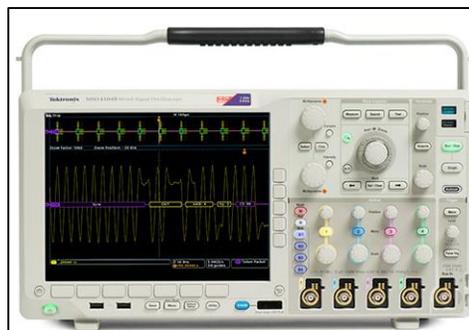


Figura 14. Osciloscopio "Tektronix MSO 4034B".

### 3.3. Simulación.

Para la simulación del convertidor Buck síncrono se utiliza el software PSIM, el cual es desarrollado por la empresa Powersim, para la simulación de circuitos en electrónica de potencia, control de motores y sistemas dinámicos.

El circuito del convertidor buck se simula en base a diferentes condiciones.

La primera se realiza en condiciones ideales, donde se toman los valores ideales de los componentes donde no se toman en cuenta las pérdidas generadas por los dispositivos.

La segunda se realiza en condiciones reales, donde se toman algunos valores que entrega el fabricante de cada elemento para realizar las modificaciones en los componentes para la simulación.

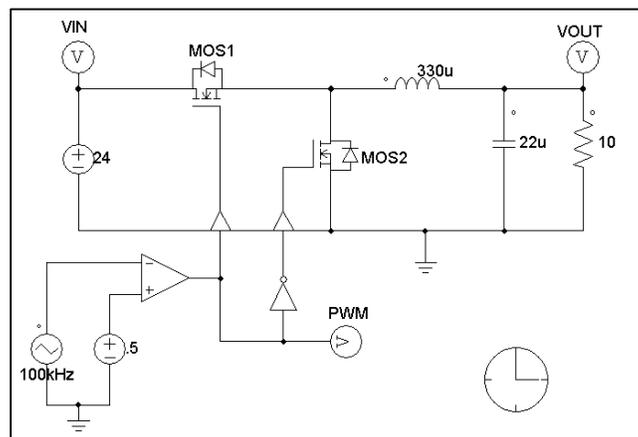
En la Tabla 1 se ilustran los parámetros de la simulación para ambos casos.

Voltaje de entrada (Vi)	Frecuencia (KHz)	% Duty cycle	Carga ( $\Omega$ )
24	100	0,25	10
24	100	0,50	10
24	100	0,75	10

Tabla 1. Parámetros de simulación.

#### 3.3.1. Simulación en condiciones ideales.

En esta simulación se ilustra el funcionamiento del convertidor Buck, donde no se generan pérdidas en voltaje y corriente por impedancias. En el siguiente circuito **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se ilustra la configuración del convertidor Buck síncrono.



	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Figura 15. Circuito del convertidor Buck en condiciones ideales.

En esta simulación se buscan los componentes para realizar el circuito, se asignan los valores de cada elemento y se configuran los parámetros de la señal PWM; que se conforma por una fuente de señal triangular que es comparada con un voltaje de referencia DC.

Se establecen los puntos de medición, para medir la corriente por el inductor se debe activar del parámetro de la bobina Current Flag cambiando su estado de 0 a 1 y luego se definen los parámetros de simulación en simulation control.

A continuación se ilustran las gráficas obtenidas por la simulación con respecto a los parámetros asignados en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

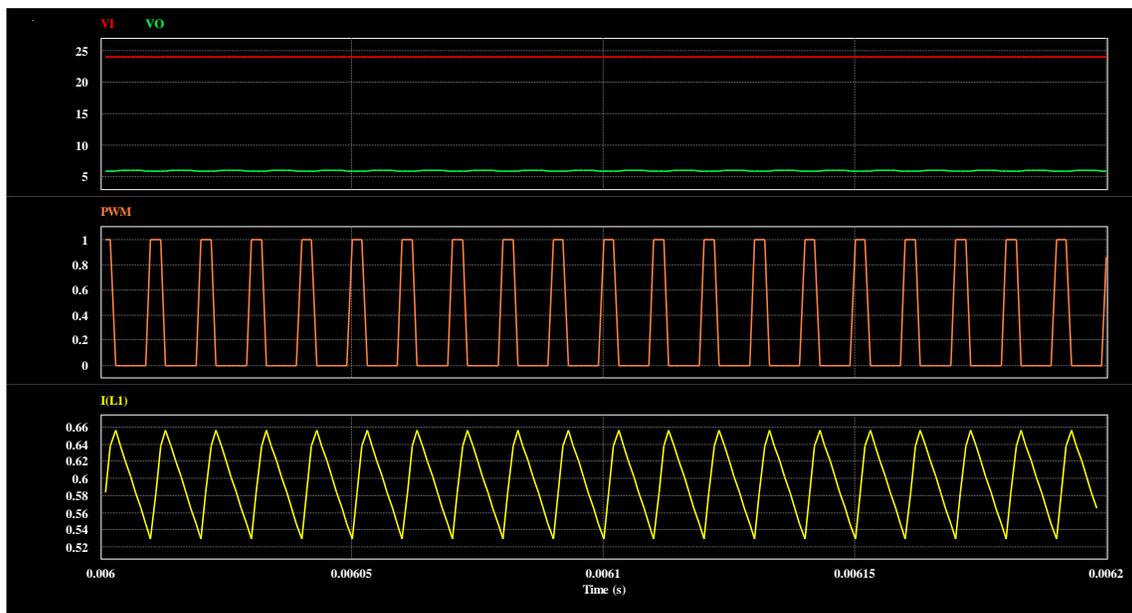


Figura 16. Con un Duty cycle del 25%.

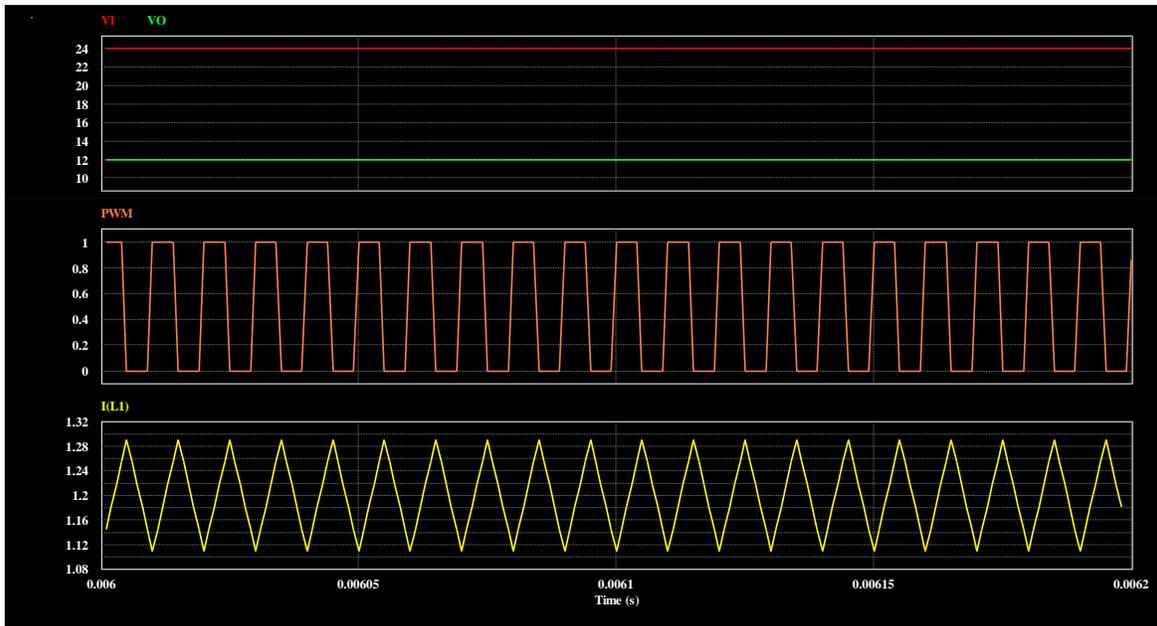


Figura 17. Con un Duty cycle del 50%.

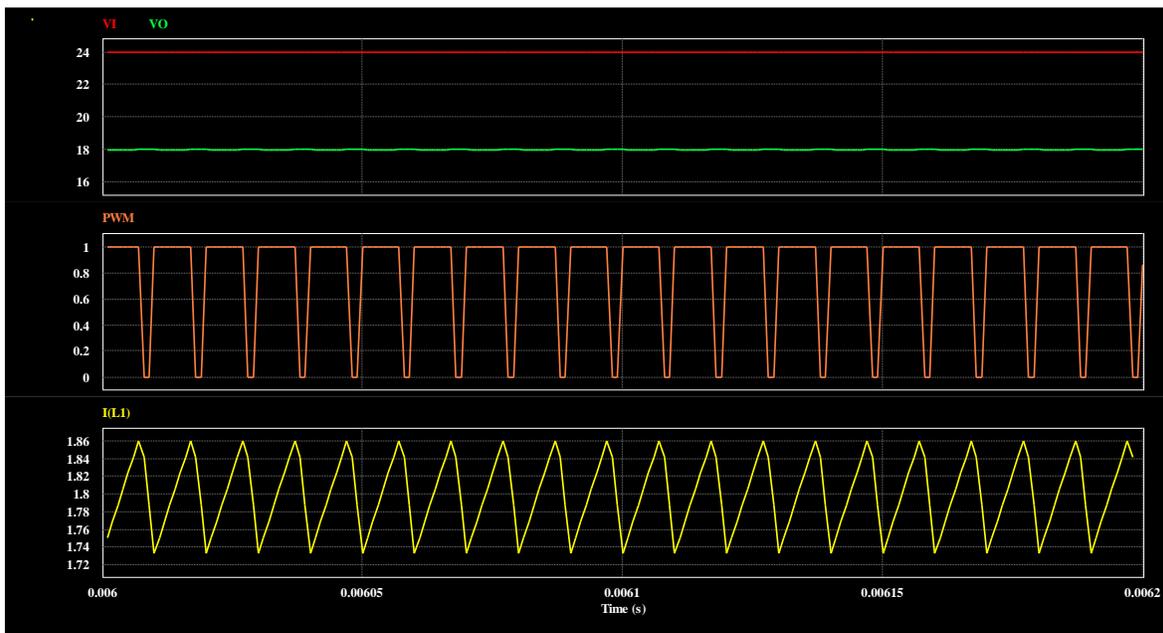


Figura 18. Con un Duty cycle del 75%.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

En las anteriores figuras

Se observa el cambio realizado en el PWM, ya que modificando el Duty Cycle se puede variar el voltaje de salida del convertidor Buck. Esta relación se puede expresar con la ecuación (1) (<http://www.academia.edu/>, 2016, pág. 174).

$$V_{out} = Duty * V_{in} \quad (1)$$

Donde:

$V_{OUT}$ : Es el voltaje de salida.

$V_{IN}$ : Es el voltaje de entrada.

Duty: Es el ciclo de trabajo del PWM.

De acuerdo con los resultados obtenidos en las gráficas anteriores se comprueba la relación que representa la ecuación antes mostrada, ya que el  $V_{OUT}$  de las gráficas es igual al  $V_{OUT}$  obtenido en la ecuación.

### 3.3.2. Simulación en condiciones reales.

En el circuito 2 del convertidor Buck, se observan los componentes con los valores reales según las características de cada dispositivo y así observar el comportamiento del convertidor.

Los valores asignados son los siguientes:

- ESR y voltaje máximo del condensador.
- DCR y corriente máxima del inductor.
- La  $R_{DS(on)}$  y las caídas de voltaje de los transistores Mosfet.
- El valor real de la carga.

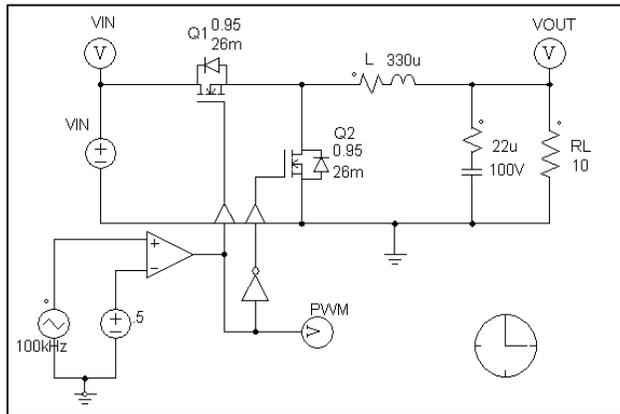


Figura 19. Circuito del convertidor Buck en condiciones reales.

A continuación se ilustran las gráficas obtenidas por la simulación con respecto a los parámetros asignados en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

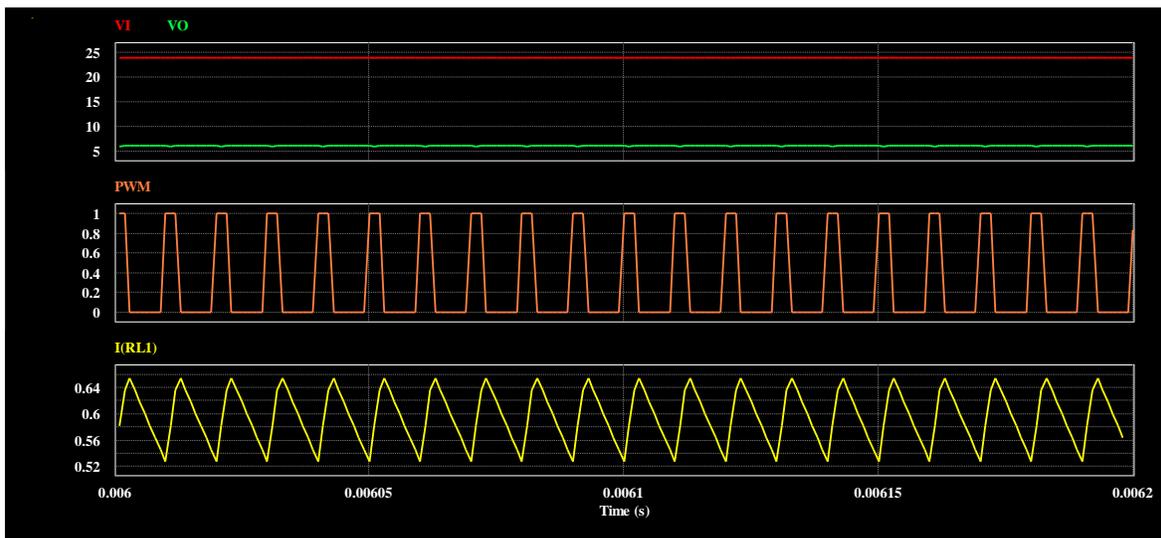


Figura 20. Con un Duty cycle del 25%.

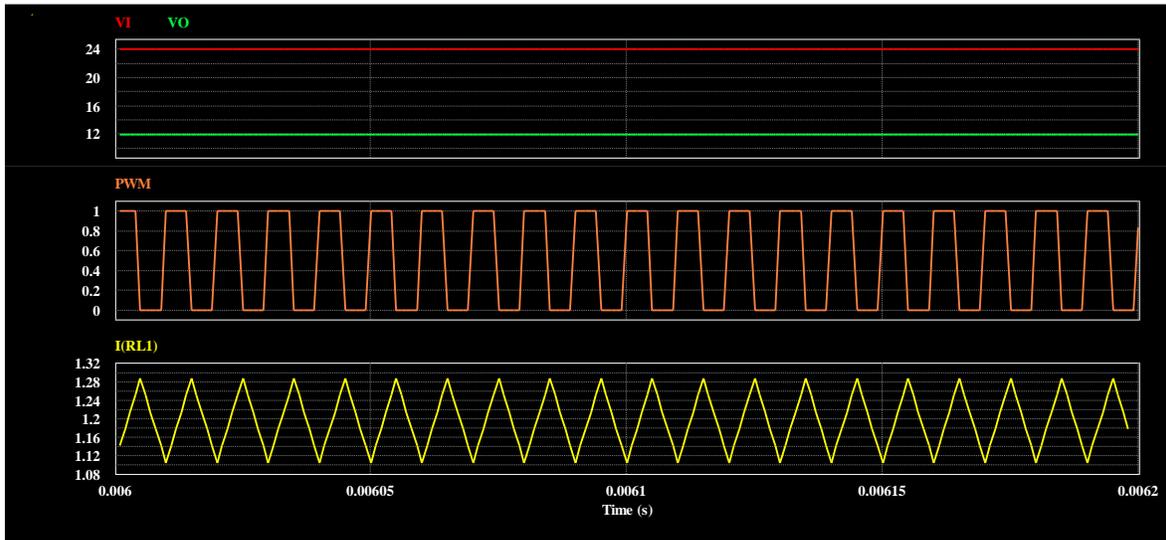


Figura 21. Con un Duty cycle del 50%.

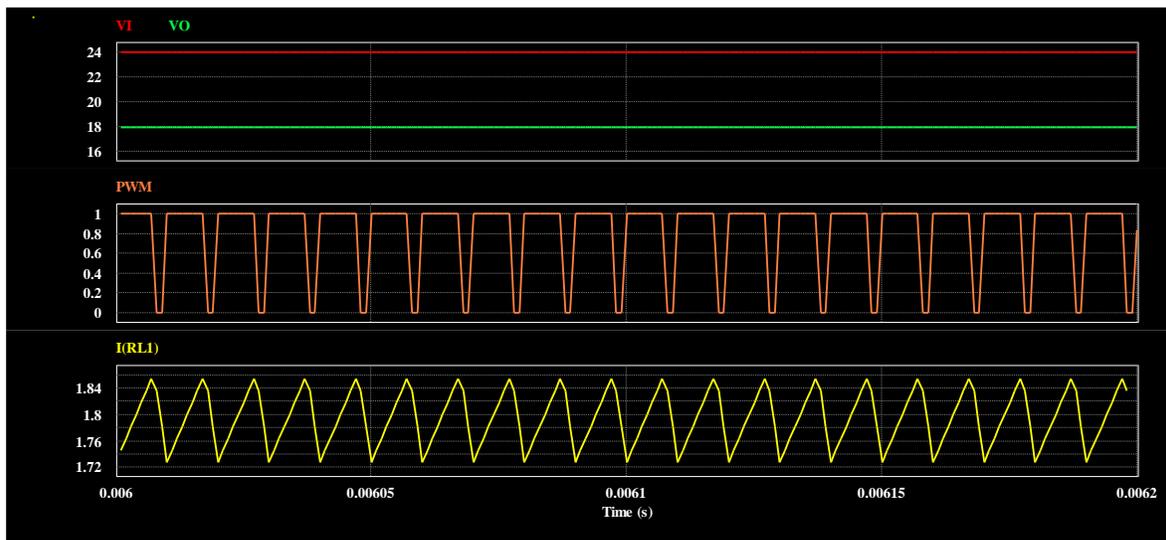


Figura 22. Con un Duty cycle del 75%.

En las anteriores figuras se observa el cambio realizado en el PWM, ya que el  $V_{OUT}$  no solo depende de las modificaciones en el Duty cycle, sino también por los valores modificados en los componentes que integran el convertidor, ya que estos generan pérdidas de energía, por lo tanto, la relación del voltaje de salida tiene algunas diferencias con los valores calculados con la .

### 3.4. Construcción.

La construcción del convertidor buck se realiza en diferentes etapas.

#### 3.4.1. Fuente para el control.

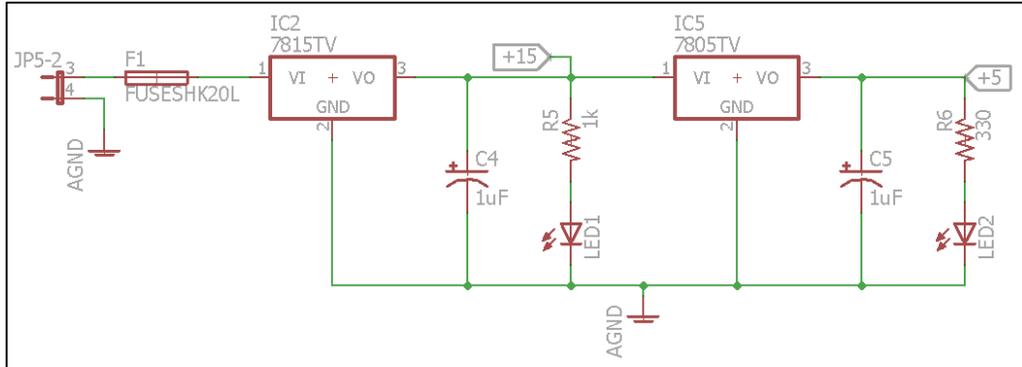


Figura 23. Circuito de alimentación para el control.

Esta fuente alimenta los circuitos del generador PWM, la compuerta NOT, el Driver y el sensor de corriente por lo tanto es de gran importancia para el convertidor, es auto sustentable ya sea con el voltaje que hay en la entrada o el voltaje que hay en la salida y también se puede hacer de forma externa en caso de ser necesario.

Cuenta con un fusible para proteger el control y dos diodos led que sirven como indicadores de funcionamiento.

#### 3.4.2. Generador PWM con el IC SG3524.

Con el generador PWM se define el ciclo de trabajo, la frecuencia de operación con que trabaja el convertidor buck, en el circuito 4 se observa la configuración realizada para lograr los parámetros de diseño.

La frecuencia se halla de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$f = \frac{1}{RC} \quad (2)$$

Donde:

R son las resistencias “R2+R3”: con el trimmer R3 se logra modificar la frecuencia de operación del convertidor.

C es el capacitor “C2” (alldatasheet, 2016, pág. 7)

El ciclo de trabajo se modifica con el potenciómetro “R10”.

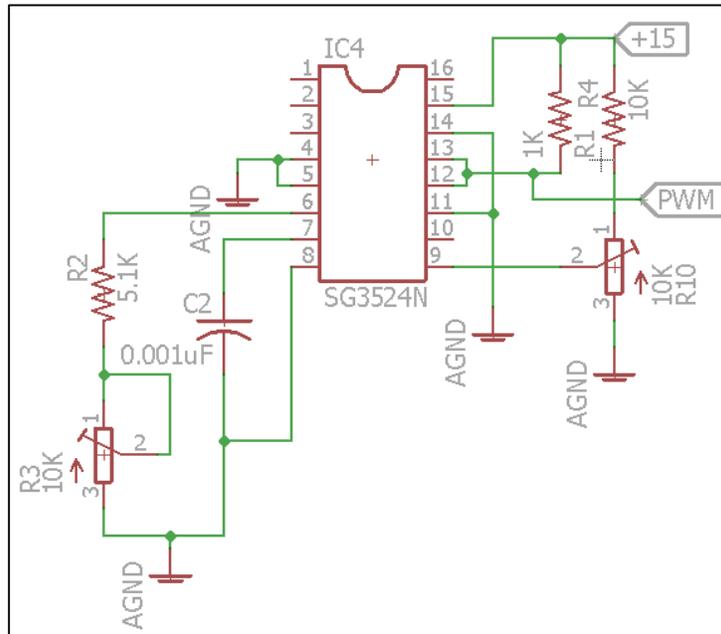


Figura 24. Generador de señal PWM.

En el datasheet de CI SG3524 puede observar con más de talle la operación de este circuito integrado. Para ver el datasheet dar clic [aquí](#). (alldatasheet, 2016)

Para desfasar la señal PWM 180° y operar el driver se utiliza una compuerta lógica NOT (negador) que es del tipo CMOS y nos permite trabajar en un rango de voltaje de 3V a 15V. Para ver el datasheet dar clic [aquí](#). (www.alldatasheet.es, s.f.)

También se tiene la opción de operar con una señal PWM externa, inhabilitando el PWM integrado en la tarjeta. .

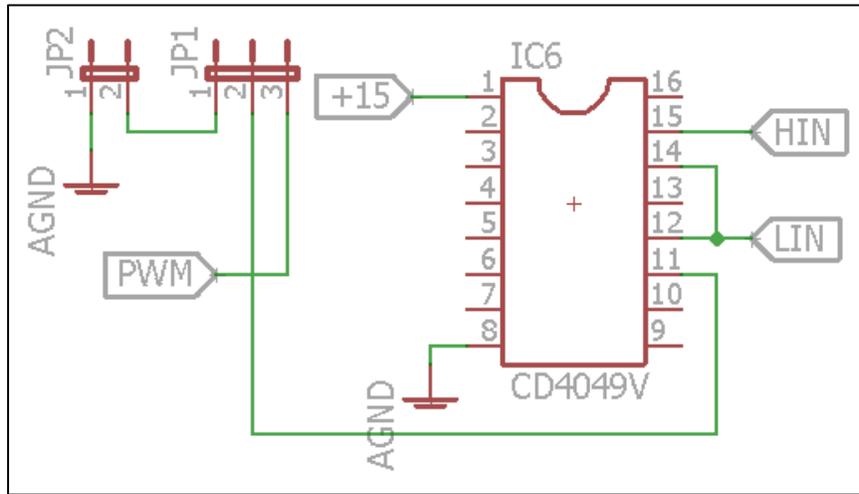


Figura 25. Negador de la señal PWM.

### 3.4.3. Driver IR2110.

Este CI es quien permite la conmutación de los Mosfet de forma complementaria en el circuito de potencia (ver figura 26), ya que es necesario para su correcta operación usar dos señales, las señales entrantes se encuentra desfasadas 180°. Para ver el datasheet dar clic [aquí](http://www.alldatasheet.es). (www.alldatasheet.es, 2016)

En la figura 27 se aprecia la señal que es necesaria para la operación del convertidor Buck.

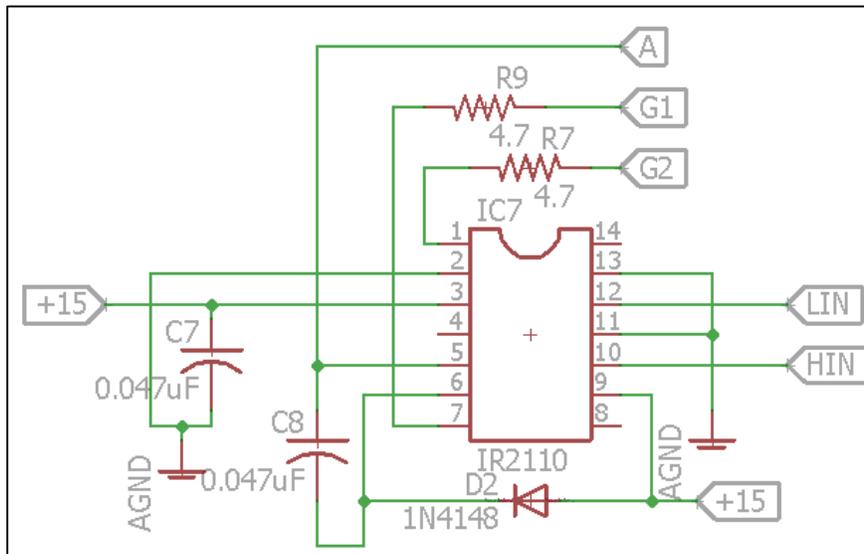


Figura 26. Driver que controla los Mosfet's.

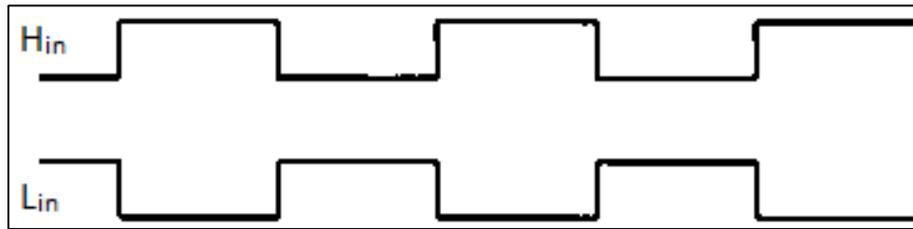


Figura 27. Señal desfasada que entra al driver.

### 3.4.4. Circuito de potencia.

Este circuito permite convertir un voltaje DC a uno de menor magnitud por medio de la configuración de dos mosfet, una bobina y dos capacitores. La capacidad de voltaje de entrada en este circuito se encuentra limitada por el capacitor que hay en la entrada, ya que el voltaje máximo que soporta es de 100V.

La potencia máxima de este convertidor está dada por la siguiente ecuación:

$$I_{max} * V_{out\ max} = W_{max} \quad (3)$$

Donde:

$I_{max}$  es la corriente que soporta el inductor.

$V_{OUTmax}$  es el voltaje de salida con un duty cycle del 90%.

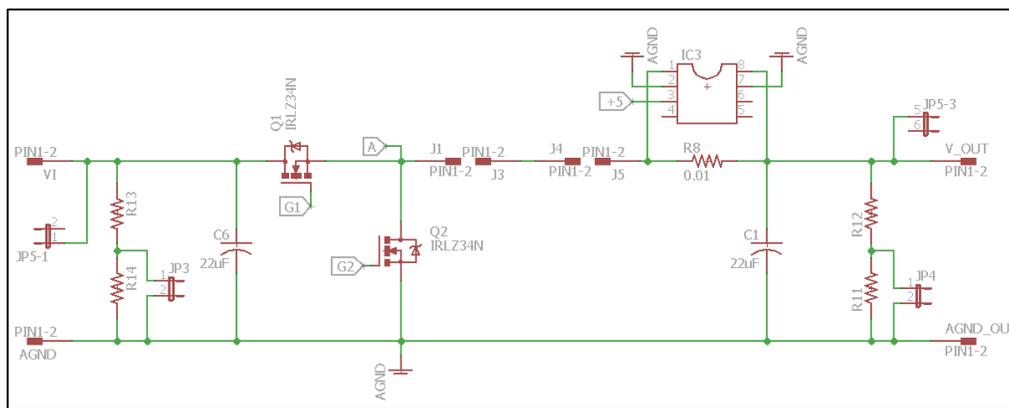


Figura 28. Potencia del convertidor buck.

Los divisores de tensión que se encuentran en la entrada y la salida son corresponden a un 10% de la tensión allí presente, con el fin de sensor estos voltajes y se puedan usar en sistemas como lo son la FPGA, DSP, Arduino.

El convertidor Buck se puede representar con tres circuitos que muestran los estados de operación y se ilustran en las figuras 29, 30 y 31.

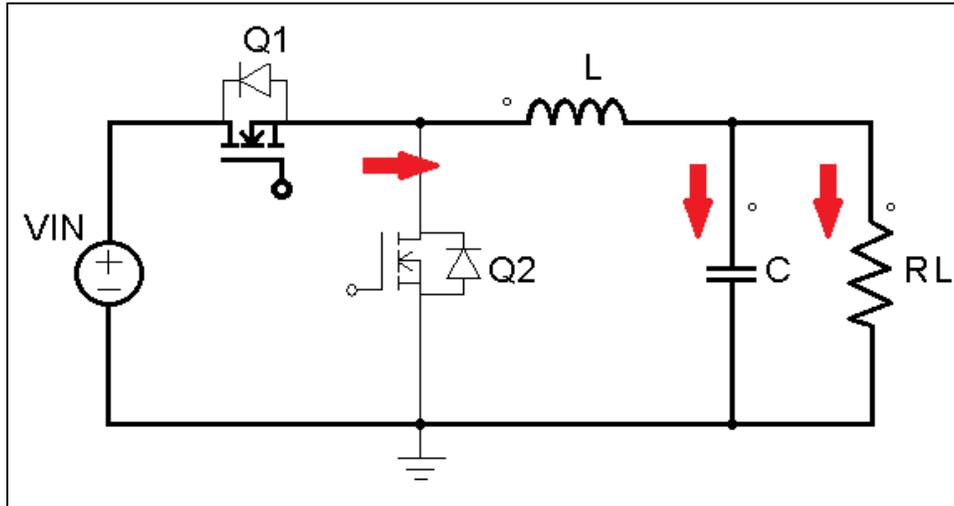


Figura 29. Durante el estado ton.

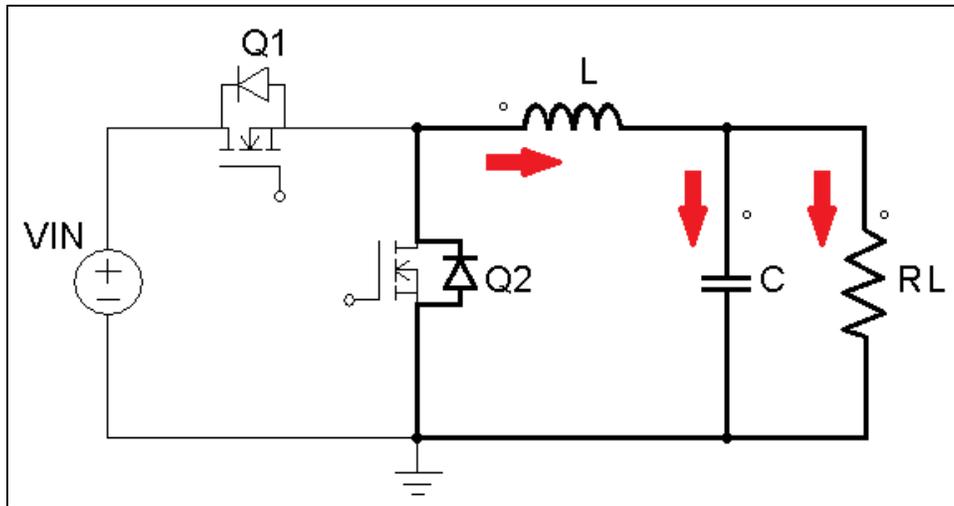


Figura 30. Durante el estado tDead.

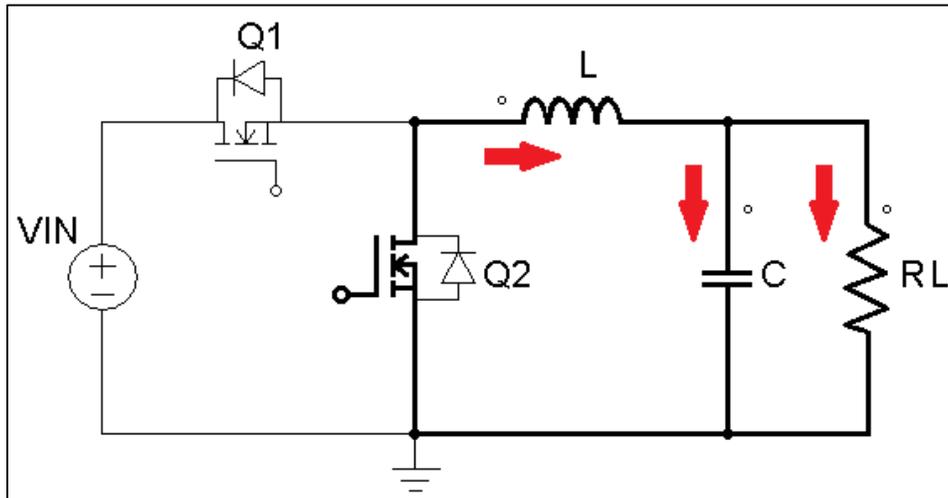


Figura 31. Durante el estado toff.

- Durante el estado  $t_{on}$ , entra en operación el Mosfet Q1, durante este tiempo se almacena energía en la bobina, donde hay una transferencia de energía desde la entrada hacia la resistencia de carga ( $R_L$ ) y capacitor (C). Como se ilustra en el circuito 1.
- En el estado  $t_{Dead}$  se apaga el mosfet Q1, mientras que el diodo del mosfet Q2 entra en operación debido al flujo de corriente  $I_L$ , en este lapso de tiempo el inductor suministra energía para  $R_L$ , el circuito 2 representa este evento, ya que en el circuito se presentan dos tiempos muertos en la señal de control cuando Q2 conmuta.
- En el estado  $t_{off}$ , se apaga el mosfet Q1 y entra en operación el mosfet Q2, donde se aprovecha la energía almacenada en el inductor para hacer circular una corriente hacia el capacitor (C) y la resistencia de carga ( $R_L$ ) manteniendo el nivel de tensión a la salida. Este evento se muestra en el circuito 3. (Pacheco Alamos, 2007,pág.50)

### 3.4.5. Sensor de corriente INA225.

Este circuito se implementa con el fin de conocer la señal de corriente a la salida del convertidor buck, la figura 32 muestra la configuración que se implementó con el CI.



## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se exponen los resultados experimentales de la construcción del convertidor buck de 200W, en la cual se dará una breve explicación del diseño de la tarjeta PCB en el software Eagle, también se exponen los resultados obtenidos del convertido.

### 4.1. Diseño del PCB.

Para la construcción del convertidor, se realiza el diseño de una tarjeta electrónica en el software Eagle, este proceso de lleva a cabo en dos etapas.

#### 4.1.1. Primera etapa: Diseño del esquemático.

En este proceso, se realiza la distribución ordenada del esquemático con el fin de facilitar la comprensión del circuito, para esto se debe tener presente el tipo de encapsulado de los elementos a utilizar durante el montaje, ya que es de gran importancia por la distribución de pines, en caso de no encontrar el elemento en específico se pueden homologar por componentes que tengan el mismo encapsulado y la misma distribución de pines.

También es posible realizar una búsqueda de dichas librerías en la página del fabricante. <http://www.cadsoftusa.com/>

El circuito del convertidor buck está dividido en tres secciones como: la etapa de potencia, el circuito de disparo para los mosfet y la fuente de alimentación para el circuito de disparo, desde la figura 33 hasta la 37 se observan los circuitos.

El circuito de la figura 38 pertenece al sensor de corriente.

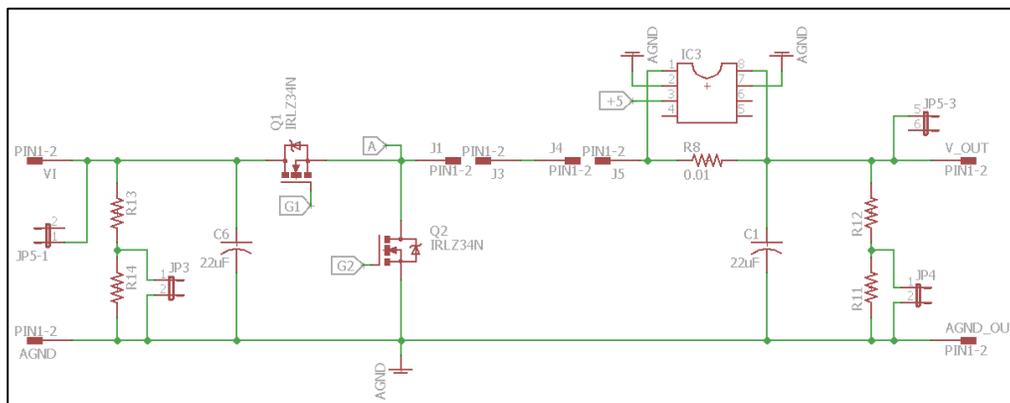


Figura 33. Circuito de potencia.

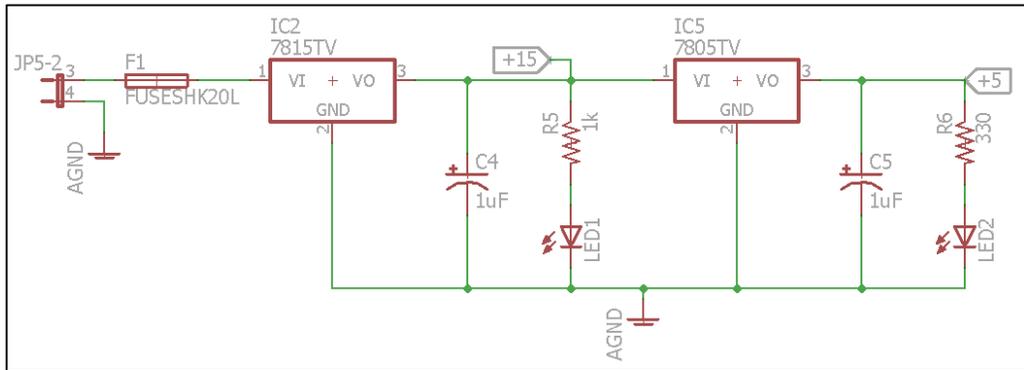


Figura 34. Circuito de alimentación para el circuito de disparo.

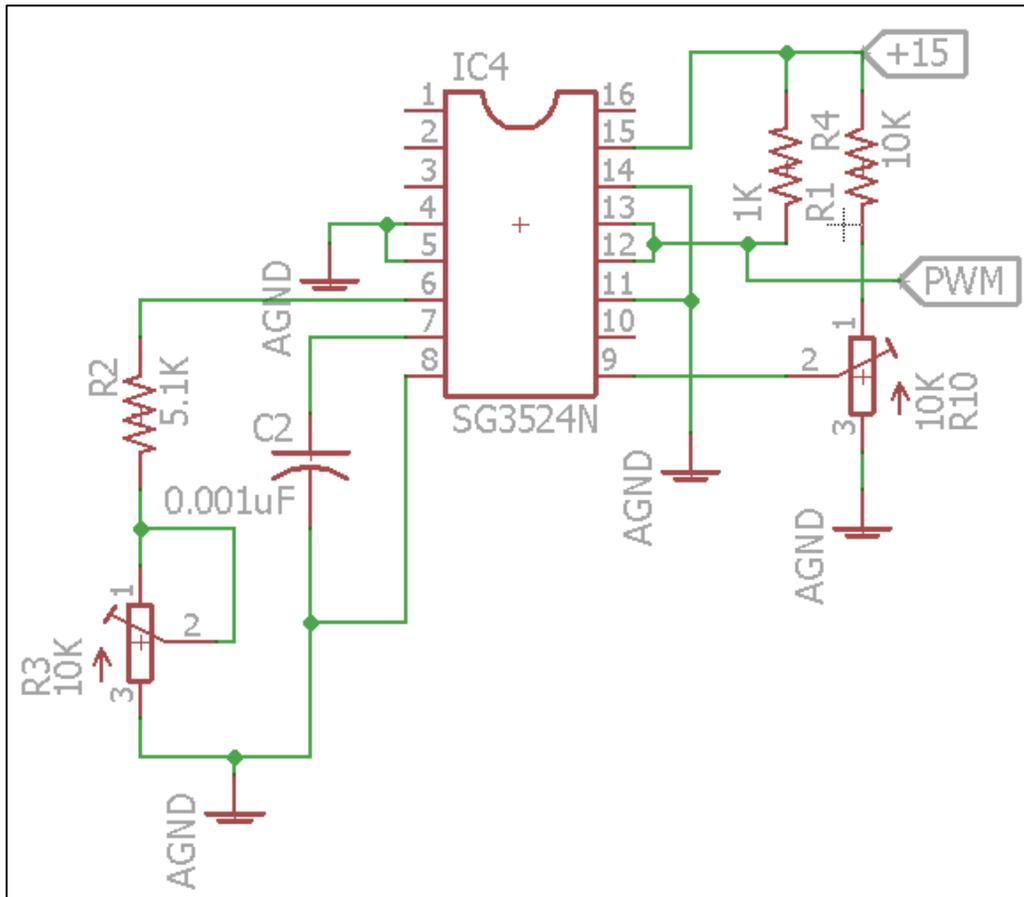


Figura 35. Generador de señal PWM.

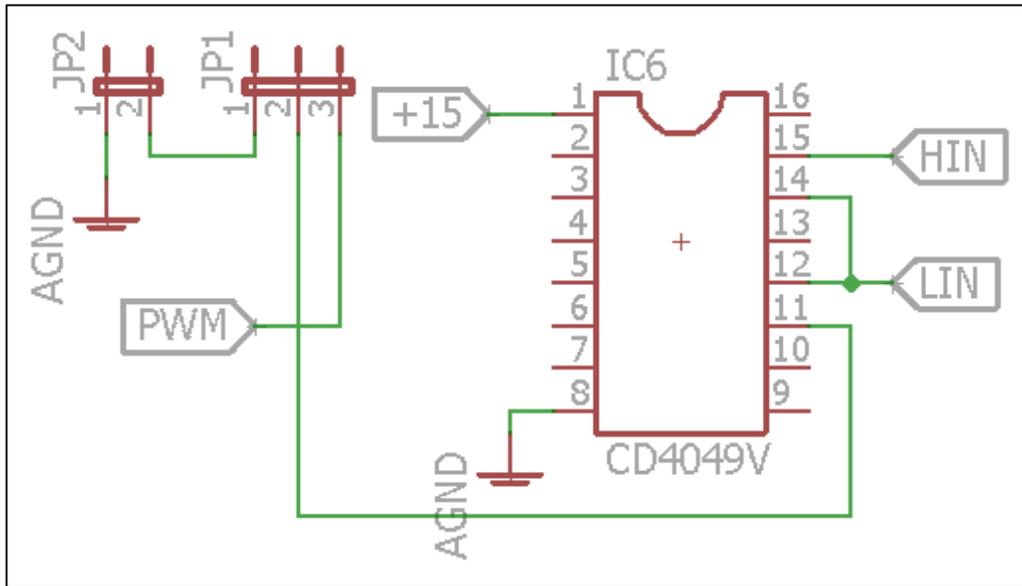


Figura 36. Circuito negador de la señal PWM.

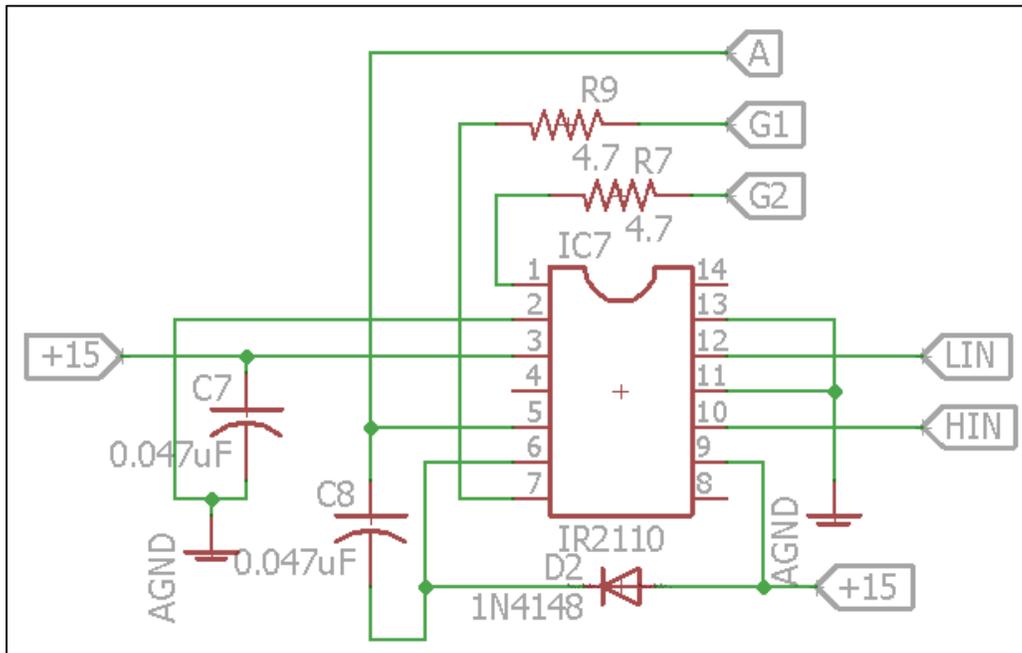


Figura 37. Circuito del driver para los Mosfet.

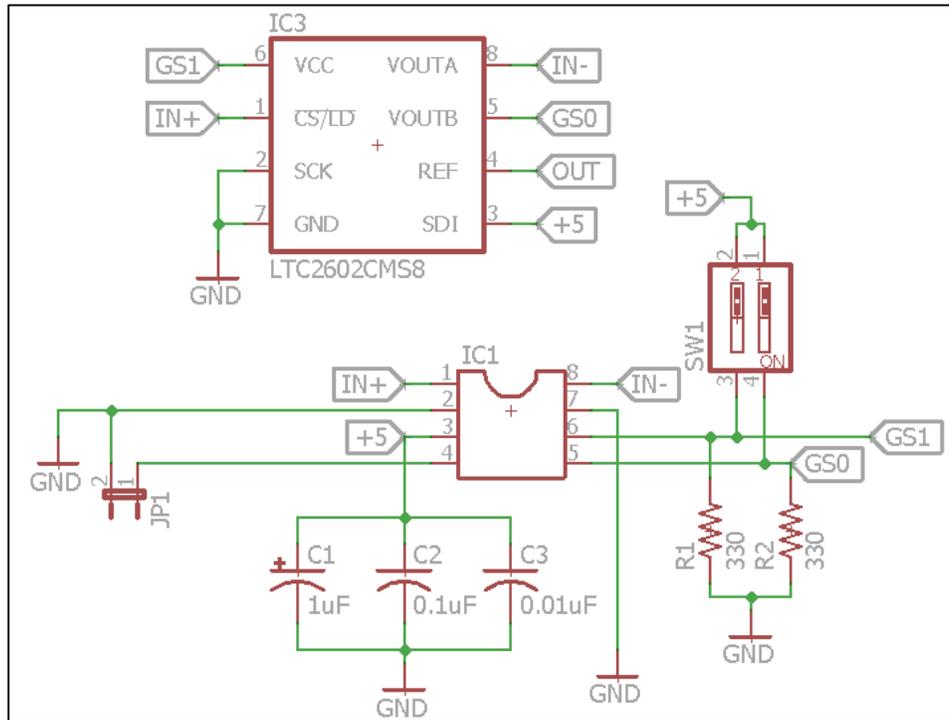


Figura 38. Circuito para el sensor de corriente.

#### 4.1.2. Segunda etapa: Diseño de la tarjeta electrónica.

Para el diseño de la tarjeta electrónica o PCB se debe tener presente la corriente que circula por las pistas y así poder hacer una distribución adecuada de los componentes, teniendo esto claro se realiza la distribución del circuito por bloques, siendo esta; la forma más práctica y rápida para hacer el diseño de la tarjeta, también hay que seguir algunos criterios de diseño los cuales son fundamentales para el trabajo en el software Eagle. Como lo son: el no llegar a un pad de forma tangencial, no llevar más de cuatro pistas a un pad, no realizar en una pista trazos con ángulos de 90°, las pistas deben ser lo más cortas posibles, entre otros criterios que son muy importantes para este proceso.

#### 4.1.3. Calculo del ancho de las pistas para la tarjeta electrónica.

Para saber el tamaño que deben tener las pistas, se deben tener algunos criterios claros para esto:

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- La corriente máxima que circulara por cada pista, este valor debe estar expresado en amperios.
- El incremento de temperatura que puede soportar, este valor debe estar expresado en grados centígrados.
- El grosor de la pista. Este último esta expresado en onzas por pie cuadrado.

Teniendo en cuenta estos criterios, se aplican las siguientes ecuaciones para el cálculo del ancho de la pista.

$$Ancho = \frac{\text{Área}}{L * 1.378} \quad (4)$$

Donde L representa el grosor de la pista, para conocer el área se utiliza la siguiente ecuación.

$$\text{Área} = [I / (k1 * \Delta T^{k2})]^{1/k3} \quad (5)$$

Donde:

I, es la corriente máxima.

$\Delta T$ , es la diferencia de temperatura en la pista.

K1, K2, K3. Son constantes para el cálculo y tiene distintos valores dependiendo si la pista que calculamos es interna o externa (wordpress.com, 2016).

**NOTA:** La parte interna hace referencia al uso de más de dos capas en el diseño de una tarjeta electrónica.

El producto final en el proceso de diseño del convertidor buck y el sensor de corriente se muestra en la figura 39 y 40, donde se observa la distribución de cada circuito mencionado anteriormente y sus elementos aparecen con un nombre que los diferencia, al igual que el encapsulado y se observan las pistas realizadas para interconectar cada elemento (wordpress.com, 2016).

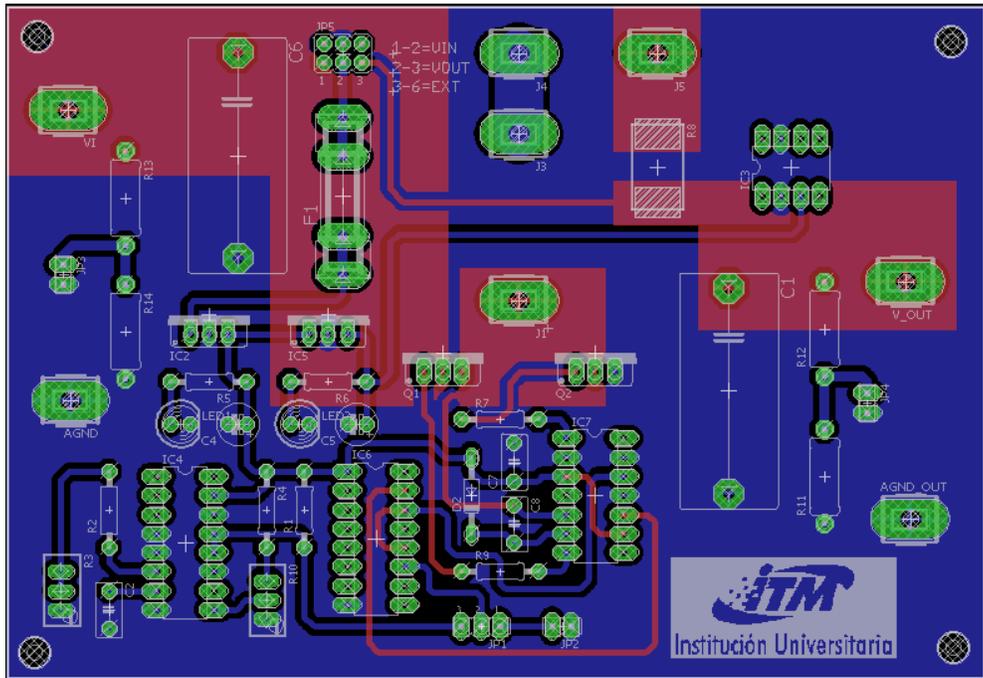


Figura 39. Circuito electrónico del convertidor buck.

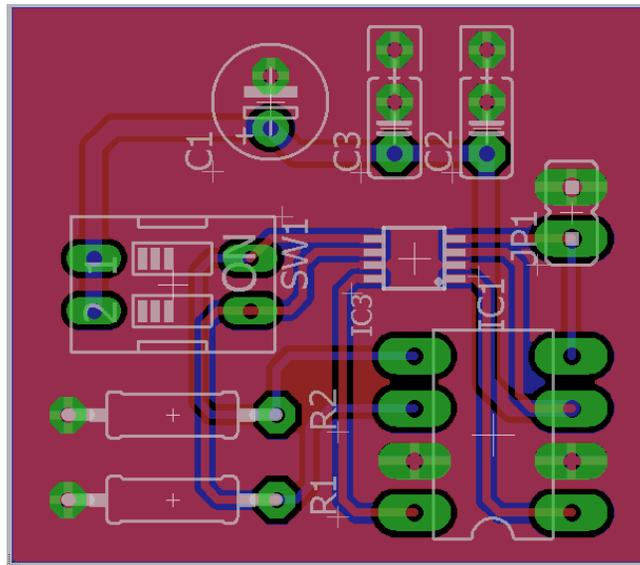


Figura 40. Circuito electrónico del sensor de corriente.

## 4.2. Resultados experimentales.

De acuerdo a los datos asignados en la tabla 2 se realizan pruebas al convertidor Buck, donde se procede con la toma de los resultados experimentales y el voltaje de salida es calculado con la siguiente ecuación:

$$V_{out} = (1 - Duty) * V_{in} \quad (6)$$

# Imagen	Duty cycle	Frecuencia KHz	Vin	Vout - Calculado
0	30%	100KHz	5V	3,5V
1	30%	100KHz	10V	7V
2	50%	100KHz	5V	2,5V
3	50%	100KHz	10V	5V
4	70%	100KHz	5V	1,5V
5	70%	100KHz	10V	3V

Tabla 2. Parámetros para realizar pruebas en el convertidor Buck síncrono.

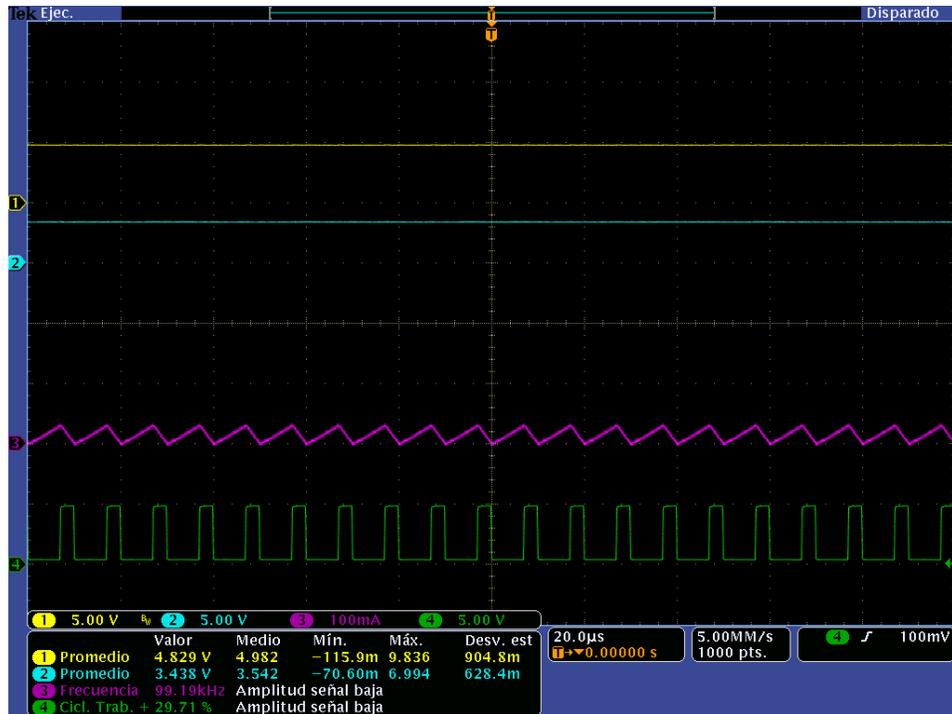


Figura 41. Esta grafica representa los parámetros tomados del # de imagen 0.

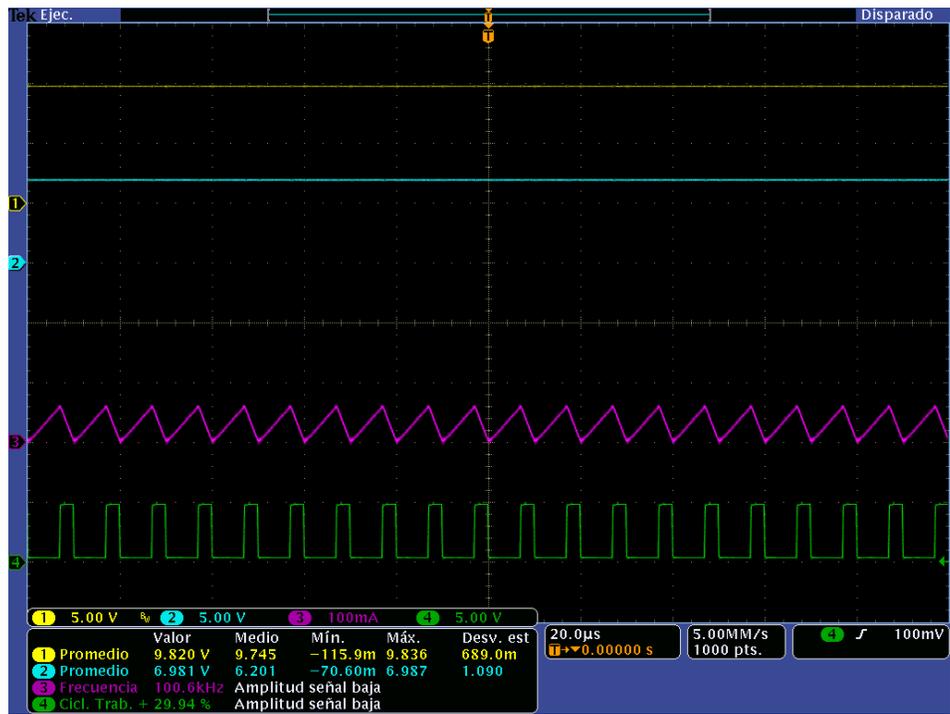


Figura 42. Esta grafica representa los parámetros tomados del # de imagen 1.



Figura 43. Esta grafica representa los parámetros tomados del # de imagen 2.

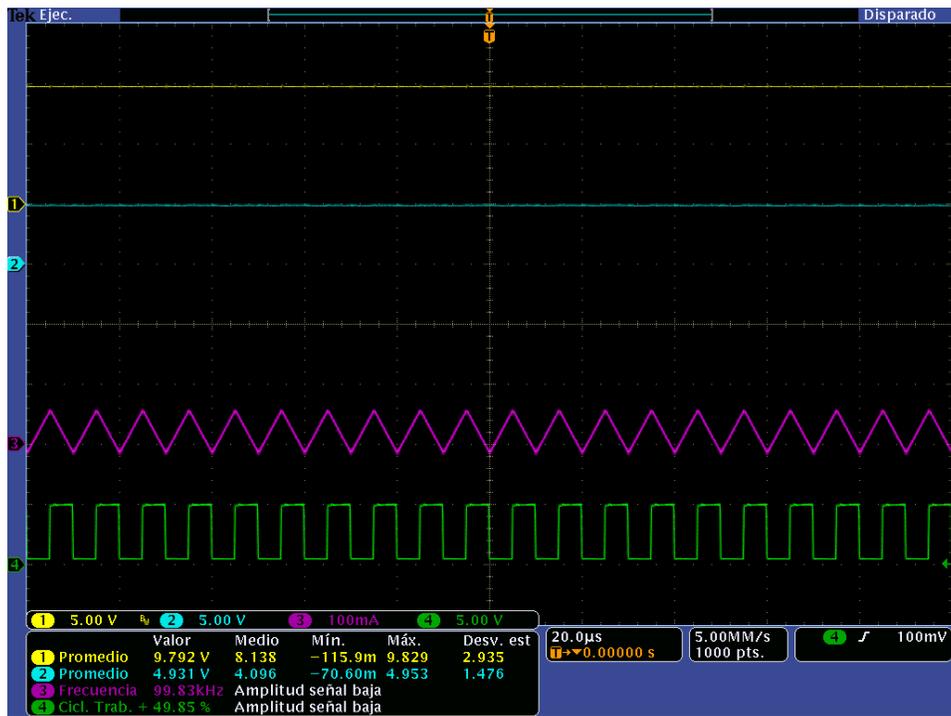


Figura 44. Esta grafica representa los parámetros tomados del # de imagen 3.

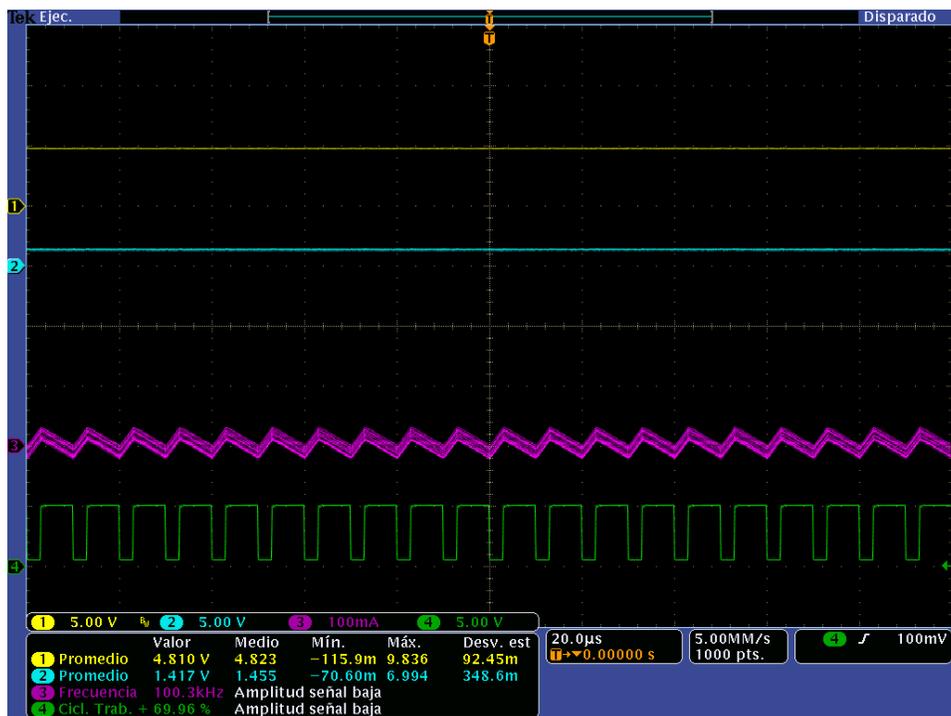


Figura 45. Esta grafica representa los parámetros tomados del # de imagen 4.

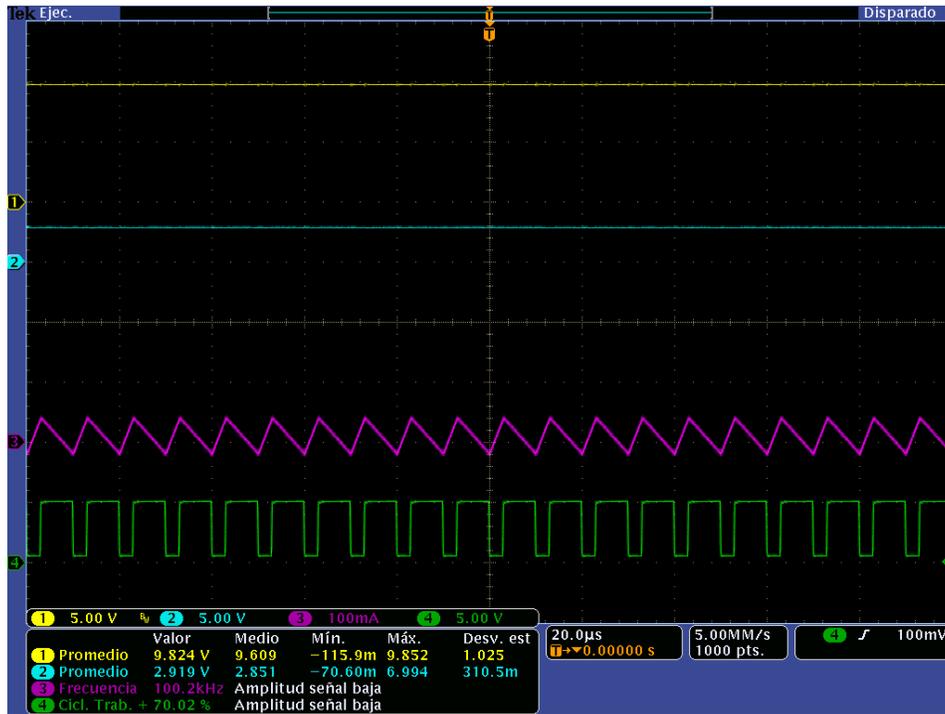


Figura 46. Esta grafica representa los parámetros tomados del # de imagen 5.

Al observar las imágenes se determina que el funcionamiento del convertidor buck es lo esperado, según los diferentes cambios realizados en el duty cycle y en los voltajes de entrada; si aplicamos la ecuación 4 podemos verificar los valores en el voltaje de salida.

Para el cálculo de la eficiencia del convertidor se puede utilizar la ecuación (7). (<http://catarina.udlap.mx>, s.f.)

$$\frac{W_{out}}{W_{in}} = \frac{\text{Potencia de salida}}{\text{Potencia de entrada}} \quad (7)$$

En la figura 47 se ilustra la señal tomada por el sensor de corriente (amarilla) en contraste de la señal de corriente (morada) tomada con una con la sonda del laboratorio, en la cual se evidencia que la señal del sensor es igual a la señal que nos muestra la sonda.

La ecuación (8) muestra la relación que hace el sensor para expresar la corriente en voltaje, ya que con esta se representa en voltaje una medida de corriente.

$$V_{osen} = G * V_{shunt} \quad (8)$$

Donde:

$V_{osen}$  es el voltaje que entrega el sensor.

G es la ganancia.

$V_{shunt}$  es la resistencia sobre la que se hace la lectura.

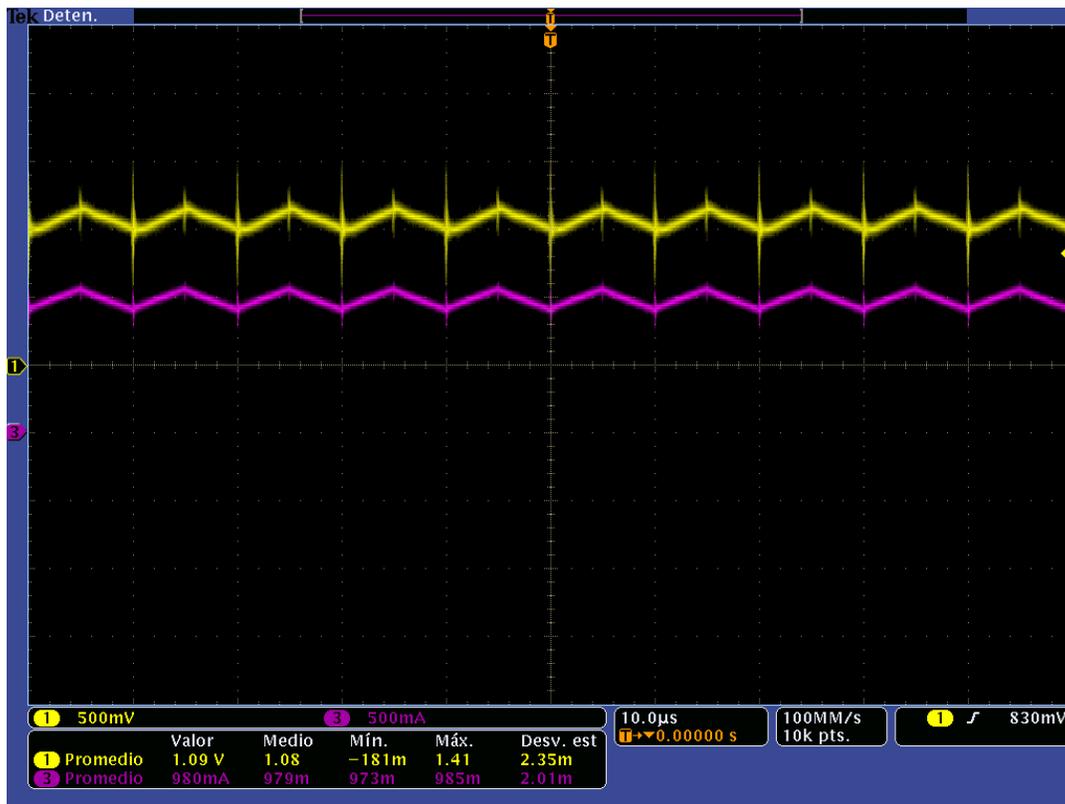


Figura 47. Señal del sensor de corriente VS la señal de la sonda.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## 5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

---

- Realizado el proceso de construcción del convertidor buck se llega a la conclusión que los elementos utilizados para su construcción tienen un comportamiento excelente desempeño, ya que su comportamiento a diferentes frecuencias y con ciclos de trabajo diferentes es el esperado. Es de mencionar que el convertidor desarrollado se puede trabajar como un convertidor bidireccional.
- Una de las características de este convertidor es la alimentación del control, ya que con una configuración de jumper se puede escoger entre el modo de auto-alimentación entre la entrada y la salida o una alimentación externa.
- Las simulaciones realizadas previamente son un gran apoyo, ya que nos permiten ver el comportamiento del circuito y de esta forma se mas conscientes del funcionamiento como producto final.
- De acuerdo a los resultados obtenidos con el sensor de corriente es necesario aplicar un filtro en esta señal para eliminar un ruido que porta y que puede ser perjudicial, en caso de ser usada en procesos de control. Por lo tanto se propone que esta modificación en el sensor de corriente se tenga en cuenta como un paso a realizar en un futuro para un proceso de instrumentación más detallada.
- Otro de los pasos a tener presente en el futuro, es el estudio del modelo matemático, que nos permita conocer más detalladamente el funcionamiento de estos dispositivos y realizar un control más eficiente del este.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

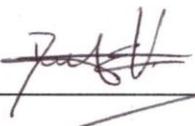
## REFERENCIAS

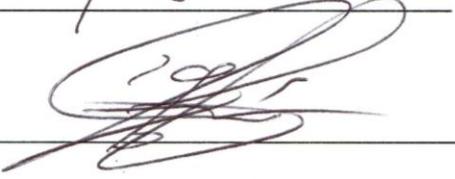
---

### Referencias Bibliográficas.

- alldatasheet. (05 de 2016). *alldatasheet.es*. Obtenido de <http://html.alldatasheet.es/html-pdf/27318/TI/SG3524/170/7/SG3524.html>
- cadsoftusa. (3 de 2016). <http://www.cadsoftusa.com/>. Obtenido de <http://www.cadsoftusa.com/downloads/libraries>
- digikey. (20 de 5 de 2016). <http://www.digikey.com/>. Obtenido de <http://www.digikey.com/es/articles/techzone/2014/mar/the-advantages-of-pulse-frequency-modulation-for-dc-dc-switching-voltage-converters>
- Galera Ortega, V. (2002). *Simulador Convertidores DC-DC*. Tarragona, España: Abdelali El Aroudi.
- <http://catarina.udlap.mx>. (s.f.). <http://catarina.udlap.mx>. Obtenido de [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/meie/tzab\\_o\\_ee/capitulo3.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/meie/tzab_o_ee/capitulo3.pdf)
- <http://www.academia.edu/>. (05 de 2016). *academia.edu*. Obtenido de [http://www.academia.edu/9163257/Electr%C3%B3nica\\_de\\_potencia.\\_Convertidores\\_aplicaciones\\_y\\_dise%C3%B1o](http://www.academia.edu/9163257/Electr%C3%B3nica_de_potencia._Convertidores_aplicaciones_y_dise%C3%B1o)
- nomadaselectronicos.wordpress. (20 de 5 de 2016). *nomadaselectronicos.wordpress.com*. Obtenido de <https://nomadaselectronicos.wordpress.com/2015/04/12/convertidores-dcdc-buck/>
- Pacheco Alamos, A. (2007). *Análisis de pérdidas del convertidor buck síncrono para aplicaciones móviles*. Cuernavaca, Morelos, México.
- wordpress.com. (05 de 2016). *wordpress.com*. Obtenido de <https://cuningan.wordpress.com/2010/10/19/calculo-de-ancho-de-pista-en-una-pcb/>
- www.alldatasheet.es. (05 de 2016). *alldatasheet*. Obtenido de <http://www.alldatasheet.es/datasheet-pdf/pdf/82793/IRF/IR2110.html>
- www.alldatasheet.es. (s.f.). *alldatasheet.es*. Obtenido de <http://www.alldatasheet.es/datasheet-pdf/pdf/8175/NSC/CD4049UBC.html>
- www.alldatasheet.es. (s.f.). *alldatasheet.es*. Obtenido de <http://www.alldatasheet.es/datasheet-pdf/pdf/787174/TI1/INA225-Q1.html>

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

FIRMA ESTUDIANTES \_\_\_\_\_ 

FIRMA ASESOR \_\_\_\_\_ 

FECHA ENTREGA: 16/06/2016

FIRMA COMITÉ TRABAJO DE GRADO DE LA FACULTAD \_\_\_\_\_

RECHAZADO \_\_\_      ACEPTADO \_\_\_      ACEPTADO CON MODIFICACIONES \_\_\_\_\_

ACTA NO. \_\_\_\_\_

FECHA ENTREGA: \_\_\_\_\_

FIRMA CONSEJO DE FACULTAD \_\_\_\_\_

ACTA NO. \_\_\_\_\_

FECHA ENTREGA: \_\_\_\_\_