

## TP N°3: Dispositivos de potencia

Accifonte, Franco - 93799  
franco.accifonte@gmail.com

Iturria, Germán - 86270  
german.iturria@gmail.com

Vázquez, Matías - 91523  
mfvazquez@gmail.com

20 de noviembre de 2014

*En este trabajo se analizará el funcionamiento de dos dispositivos semiconductores de potencia: el IGBT y el tiristor. En el caso del IGBT se modificará tanto el circuito de gate como el circuito de carga con el fin de analizar su comportamiento bajo diversas situaciones. Luego se analizará el comportamiento de un tiristor bajo distintas condiciones circuitales y de disparo.*

### 1. Parte I: IGBT

#### 1.1. Análisis preliminar

Se analizó cualitativamente el funcionamiento del circuito de la figura 1.

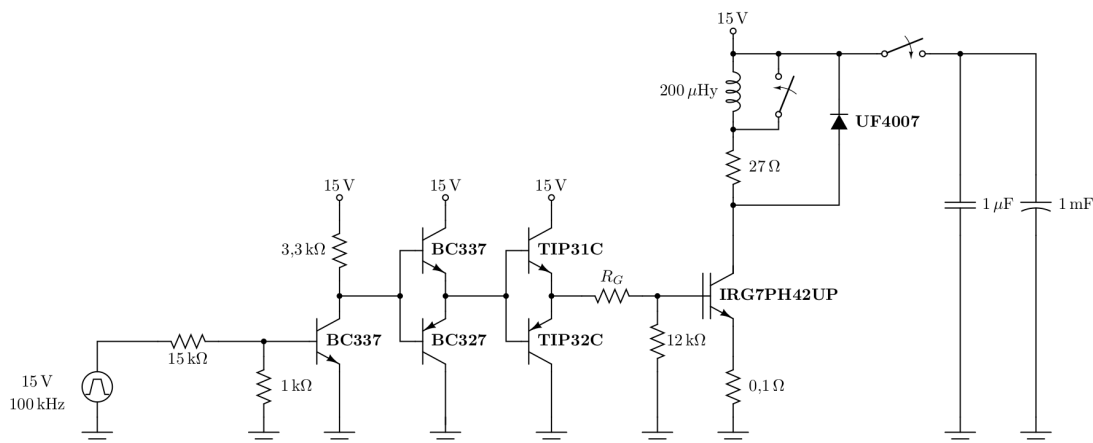


Figura 1: Circuito simplificado de disparo de un IGBT.

- Explicar por qué los transistores ocupan el lugar que ocupan, es decir, por qué es necesario que cada etapa tenga la capacidad de manejar cada vez más corriente.

Se necesita que la corriente que entrega la etapa final sea alta. Para lograr esto se conectan varias etapas consecutivas de transistores y, dado que cada etapa amplifica la corriente que recibe de la etapa anterior, es necesario que cada etapa sea capaz de manejar corrientes superiores a la etapa anterior.

- Identificar qué función cumple  $R_G$  en el circuito. ¿Qué sucede si  $R_G = 18\Omega$  o  $R_G = 1\text{ k}\Omega$ ?

La función que cumple  $R_G$  en el circuito es cargar o descargar más rápido el capacitor asociado al IGBT. Mientras más chica sea  $R_G$ , menor será el tiempo necesario para que el transistor conmute su estado.

- ¿Qué función cumple el diodo **UF4007**?

Cuando el inductor no está cortocircuitado y el transistor pasa de saturación a corte, el inductor generará una corriente para mantener el flujo magnético. Si el diodo no está conectado, el único camino que tiene esta corriente para circular es a través del transistor, y puede llegar a dañarlo. Al

conectarse el diodo, se facilita un camino por donde circular esta corriente inductiva sin dañar el transistor.

## 1.2. Mediciones del circuito

Con la ayuda de una placa experimental, donde se encuentra implementado el circuito, se realizaron las siguientes mediciones utilizando un osciloscopio digital del que se obtuvieron los datos numéricos. Con la ayuda del programa de cálculo numérico *Octave* se obtuvieron gráficos de las mediciones realizadas.

### 1.2.1. Caída de tensión y corriente sobre $R_G$

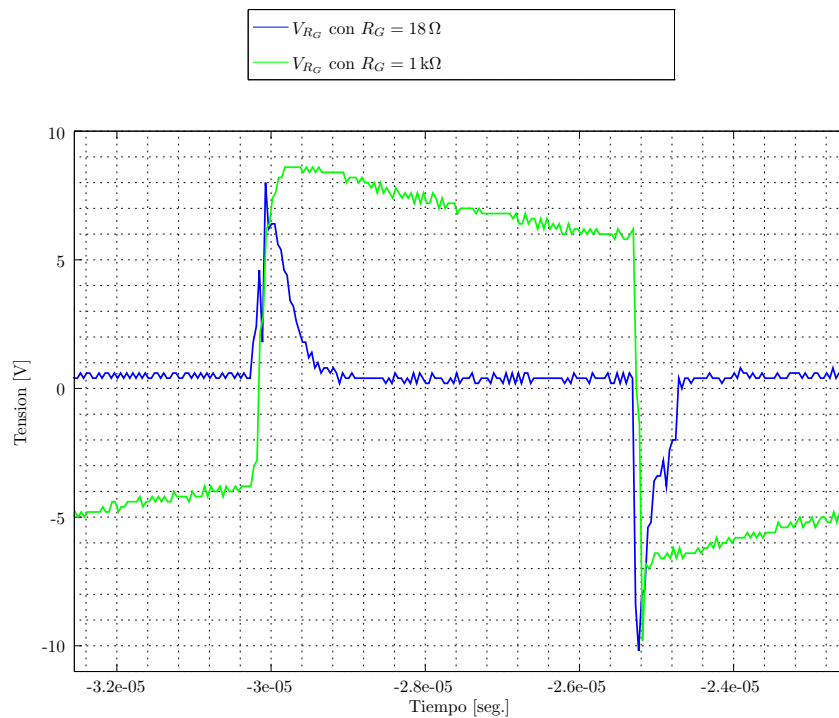


Figura 2: Caída de tensión en  $R_G$ .

Para estimar la corriente máxima registrada con cada resistencia, simplemente se buscó el valor máximo de tensión sobre  $R_G$  y se obtuvo la corriente planteando la ley de Ohm.

- Para  $R_G = 18\ \Omega$ :

$$I_{G,max} = 444\ \text{mA}$$

- Para  $R_G = 1\ \text{k}\Omega$ :

$$I_{G,max} = 8,8\ \text{mA}$$

Como se puede observar en el gráfico de la figura 2 para  $R_G = 18\ \Omega$  el capacitor asociado al IGBT logra cargarse antes de que termine el pulso, ya que la corriente es mayor, por lo tanto el IGBT logra conmutar su estado.

Para  $R_G = 1\ \text{k}\Omega$  durante el pulso la tensión no llega a cero ya que el capacitor no logra cargarse durante el pulso y por lo tanto el IGBT no logra conmutar su estado.

Las siguientes mediciones se realizaron con  $R_G = 18\ \Omega$  ya que con dicho valor logra conmutar su estado.

### 1.2.2. Capacidad de entrada

A partir de la variación en la tensión de *Gate* y la corriente de carga del IGBT, se obtuvo la capacidad de entrada mediante la ecuación 1.

$$I_G = C_{IGBT} \frac{\partial V_G}{\partial t} \quad (1)$$

Se obtuvo el rango de valores  $4,44 \text{ nF} \leq C_{IGBT} \leq 6,67 \text{ nF}$ . cuando el capacitor asociado al IGBT se encuentra cargado.

### 1.2.3. Corriente de salida y potencia con el inductor cortocircuitado

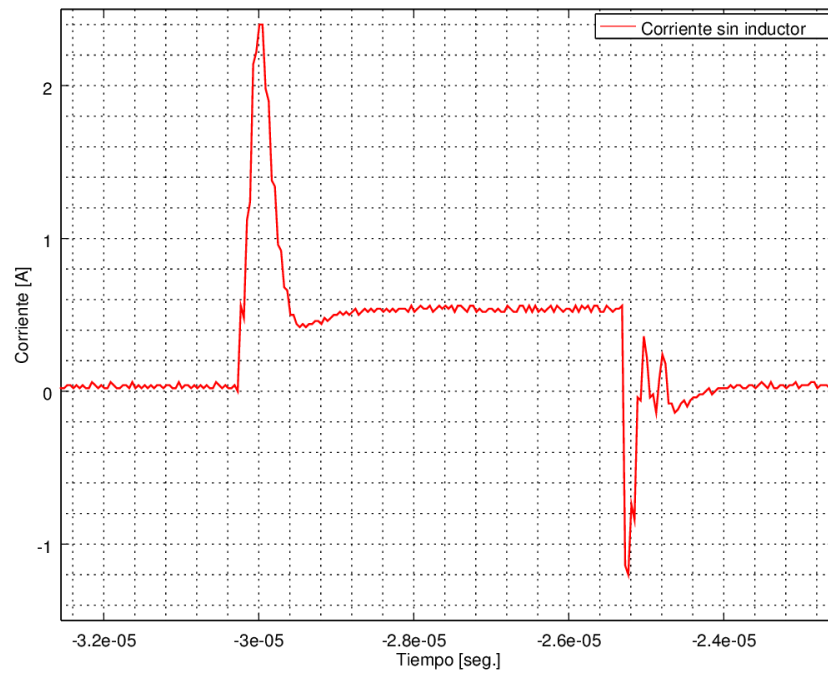


Figura 3: Corriente de salida con el inductor cortocircuitado.

En el gráfico de la figura 4 se puede observar la potencia instantánea. Calculada mediante la ecuación 2.

$$P(t) = I_E V_{CE} \quad (2)$$

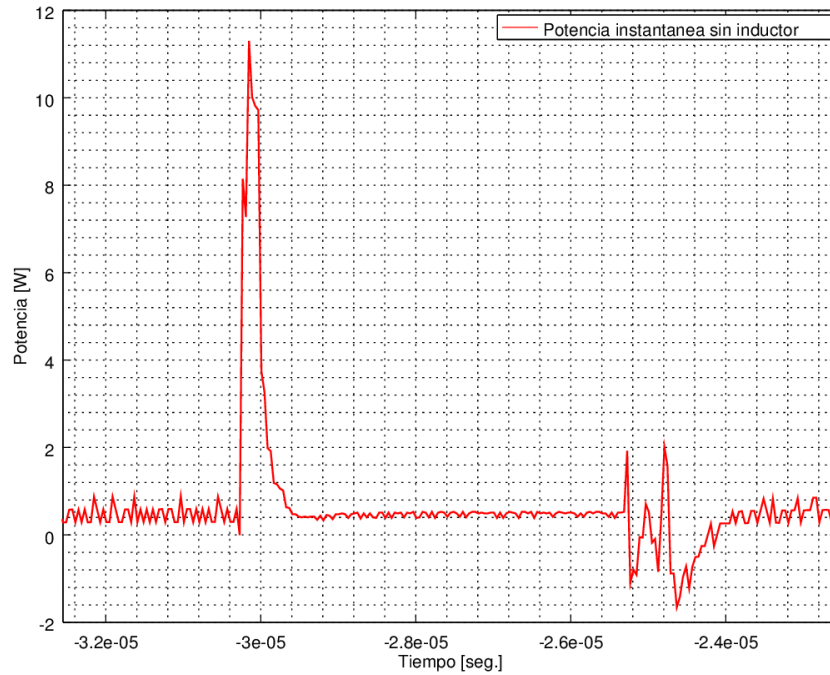


Figura 4: Potencia instantánea con el inductor cortocircuitado.

La potencia media se obtuvo mediante la ecuación 3<sup>1</sup>.

$$P_m = \frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt \quad (3)$$

Se obtuvo:

$$P_m = 650,6 \text{ mW}$$

Luego se calculó la potencia eficaz mediante la ecuación 4

$$P_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T P^2(t) dt} \quad (4)$$

Se obtuvo:

$$P_{ef} = 1,6134 \text{ W}$$

#### 1.2.4. Corriente de salida y potencia sin cortocircuitar el inductor

Se repitió la medición anterior sin cortocircuitar el inductor. Se obtuvieron los siguientes resultados.

<sup>1</sup>Se utilizó la regla del trapecio para aproximar la integral.



Figura 5: Corriente de salida sin cortocircuitar el inductor.

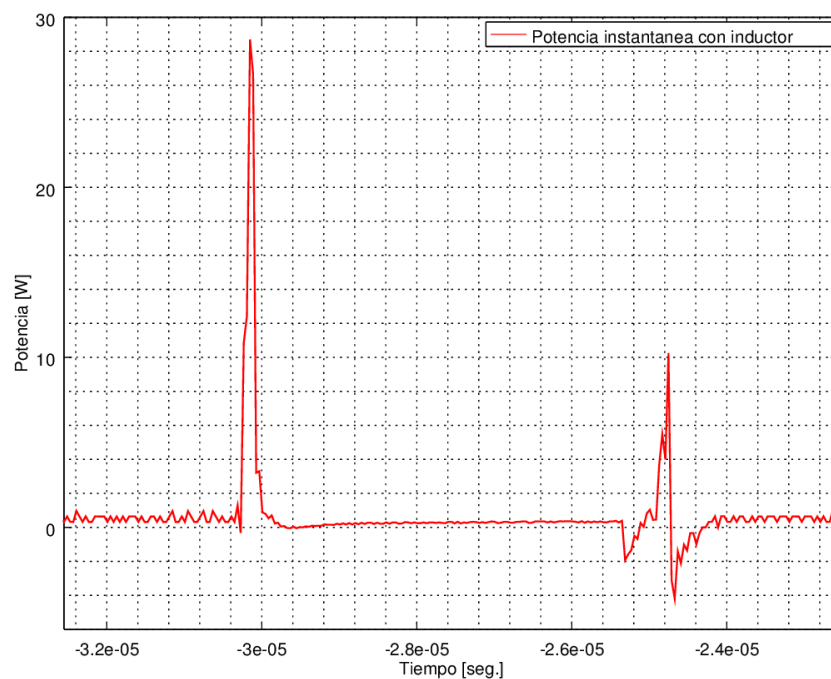


Figura 6: Potencia instantánea sin cortocircuitar el inductor.

$$P_m = 695,3 \text{ mW}$$

$$P_{ef} = 2,8865 \text{ W}$$

### 1.3. Análisis de resultados

- ¿Porque es necesario entregar mucha corriente al *Gate* del IGBT? ¿Qué importancia tiene la resistencia serie del circuito que se encarga de controlar el *Gate* de este dispositivo?

La capacidad asociada al IGBT tiene un valor elevado, entonces para llegar a la tensión de umbral es necesario entregarle mucha carga, en otras palabras mucha corriente. La importancia de la resistencia serie del circuito controlador del *Gate* es que regula la corriente que llega al *Gate*. Mientras mayor sea el valor de  $R_G$  mayor será el tiempo requerido para la conmutación del transistor. Entonces sería deseable un valor de  $R_G$  pequeño para que el IGBT llegue a conmutar su estado.

- ¿Qué ocurre si se desea controlar el IGBT con una salida digital típica de un microcontrolador, donde la máxima corriente que puede entregar es de algunos pocos mA?

Esta situación sería comparable a tener un valor de  $R_G$  elevado. La corriente que llega al gate del transistor es pequeña, por lo tanto el tiempo que se requiere para acumular carga suficiente para conmutar su estado es mayor. Puede incluso ocurrir que el transistor no llegue a conmutar su estado dentro del período de la señal, como ocurrió cuando se usó  $R_G = 1\text{ k}\Omega$ .

- A partir de la estimación de potencia disipada y de los datos térmicos de las hojas de datos, realizar el análisis térmico del IGBT y calcular la temperatura de juntura.

Aplicando el modelo térmico equivalente visto de la figura 7 se pueden obtener las temperaturas deseadas.

Se extrajeron de la hoja de datos los siguientes valores, considerando la temperatura ambiente  $T_a = 25^\circ\text{C}$ .

- $R_{jc} = 0,39^\circ\text{C/W}$
- $R_{ca} = R_{cj} - R_{aj} = -R_{jc} + R_{ja} = -0,39 + 40 = 39,61^\circ\text{C/W}$

Luego se planteó el modelo térmico equivalente:

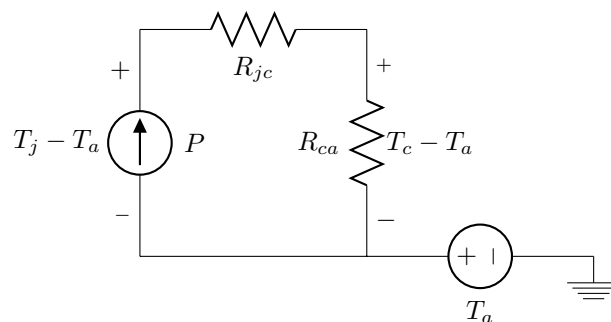


Figura 7: Modelo térmico equivalente del IGBT

Y se plantearon las ecuaciones del circuito para obtener la temperatura de la juntura  $T_j$

$$T_c - T_a = R_{ca} P$$

Entonces:

$$T_c = R_{ca} P + T_a \quad (5)$$

Luego:

$$T_j - T_c = R_{jc} P$$

Reemplazando la ecuación 5 se obtiene:

$$T_j = R_{jc} P + R_{ca} P + T_a \quad (6)$$

Con la ecuación 6 calculamos  $T_j$  cortocircuitando el inductor y sin cortocircuitar.

- Con inductor cortocircuitado.  $P_m = 650,6 \text{ mW}$

$$T_j = 51,024^\circ\text{C}$$

- Sin cortocircuitar el inductor.  $P_m = 695,3 \text{ mW}$

$$T_j = 52,812^\circ\text{C}$$

- ¿Por qué varía la corriente del IGBT con y sin el inductor conectado?

El inductor impide los saltos de corriente debido a que genera un campo magnético que se opone a la corriente. Por esta razón al conmutar el IGBT la corriente comienza desde los 0 mA y aumenta su valor sin sobresaltos hasta llegar a la corriente que se obtiene sin el inductor cuyo valor es aproximadamente  $I_C \approx 0,6 \text{ mA}$ .

## 2. Parte II: Tiristores

### 2.1. Análisis preliminar

Se analizó cualitativamente el funcionamiento del circuito de la figura 8.

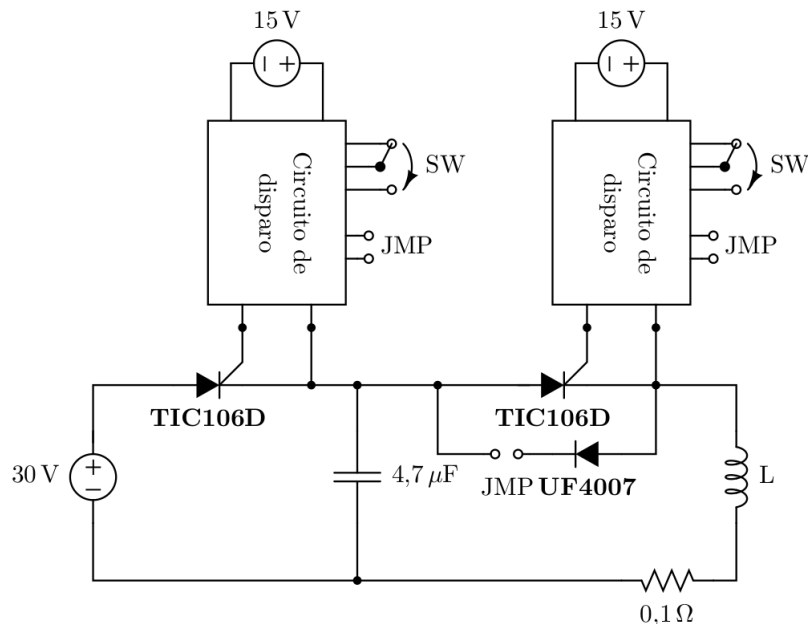


Figura 8: Circuito esquemático simplificado de disparo de los Tiristores.

Se usa el primer tiristor (a la izquierda en el esquema) para cargar el capacitor de  $4,7 \mu\text{F}$ , y el segundo para disparar la conducción de un circuito RLC por lo que se espera ver la respuesta transitoria de dicho circuito. Sin embargo, cuando no está conectado el diodo, la respuesta del circuito RLC se verá limitada por la presencia del tiristor, que impedirá que la corriente cambie de sentido. En cambio cuando el diodo está conectado, se podrá apreciar el transitorio del RLC en su totalidad.

## 2.2. Mediciones del circuito

### 2.2.1. Disparo corto con el diodo desconectado

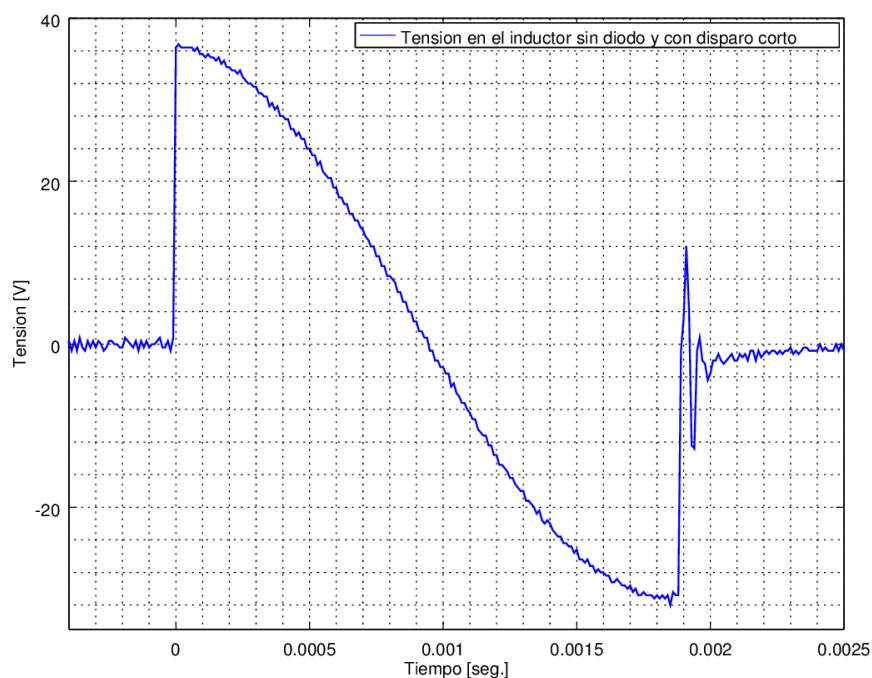


Figura 9: Tensión en el inductor respecto del terminal negativo de la fuente.

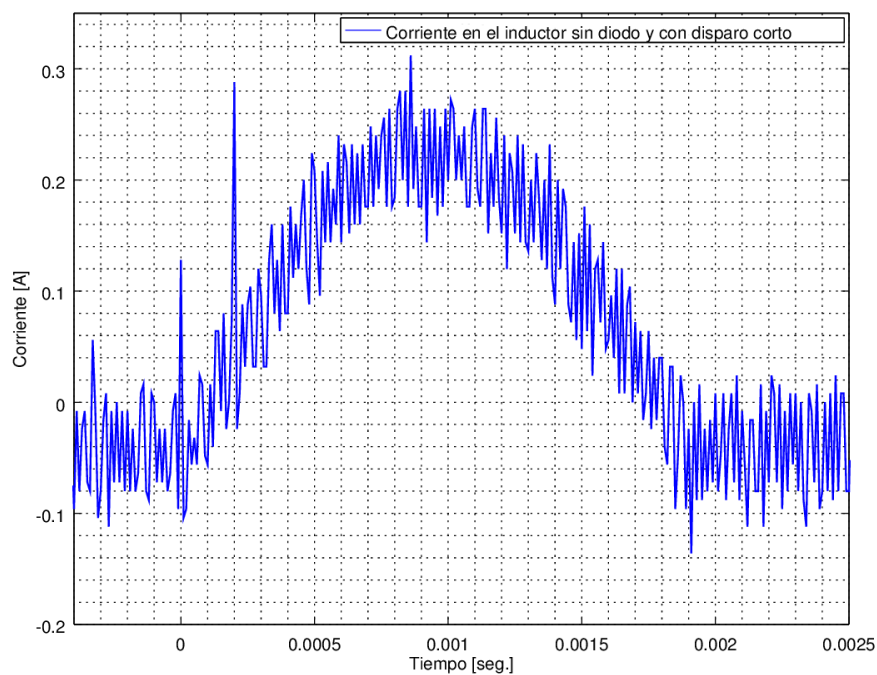


Figura 10: Corriente en el inductor respecto del terminal negativo de la fuente.



### 2.2.2. Disparo corto con el diodo conectado

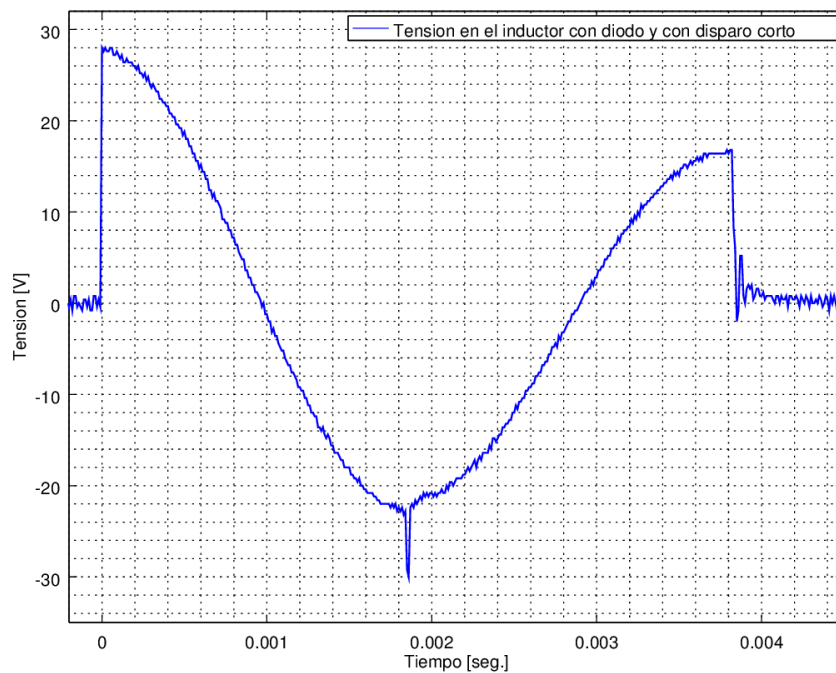


Figura 11: Tensión en el inductor respecto del terminal negativo de la fuente.

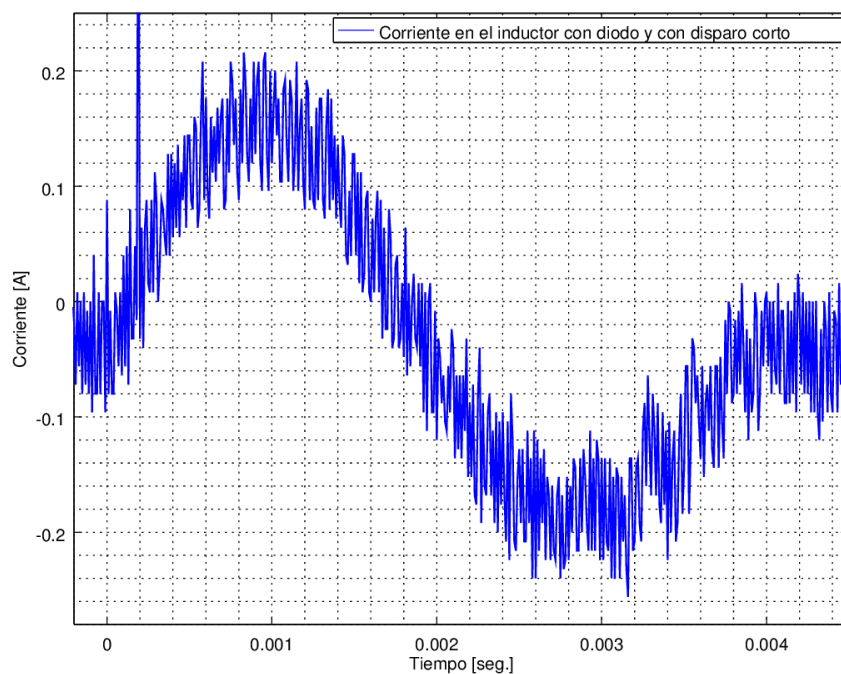


Figura 12: Corriente en el inductor respecto del terminal negativo de la fuente.

### 2.2.3. Disparo largo con el diodo conectado

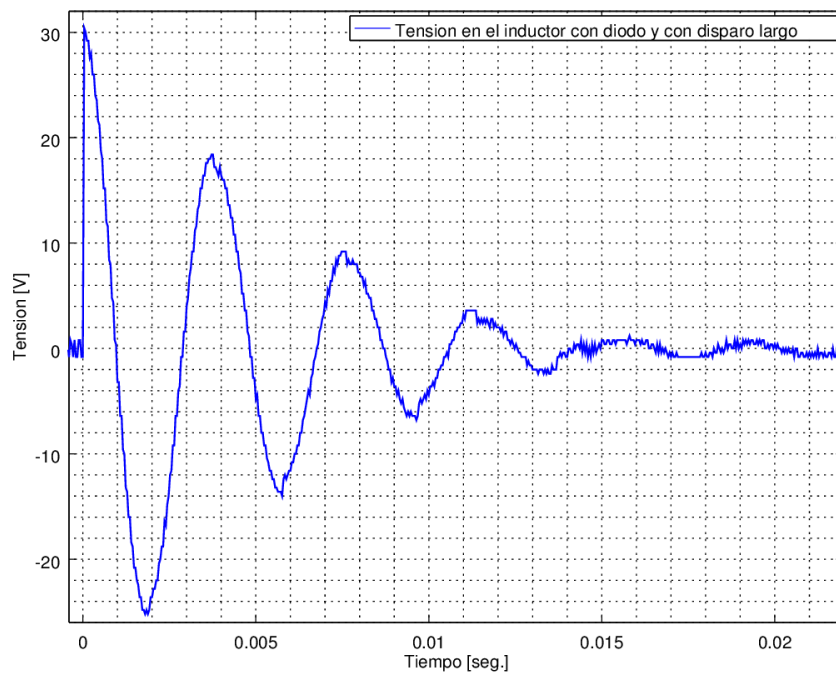


Figura 13: Tensión en el inductor respecto del terminal negativo de la fuente.

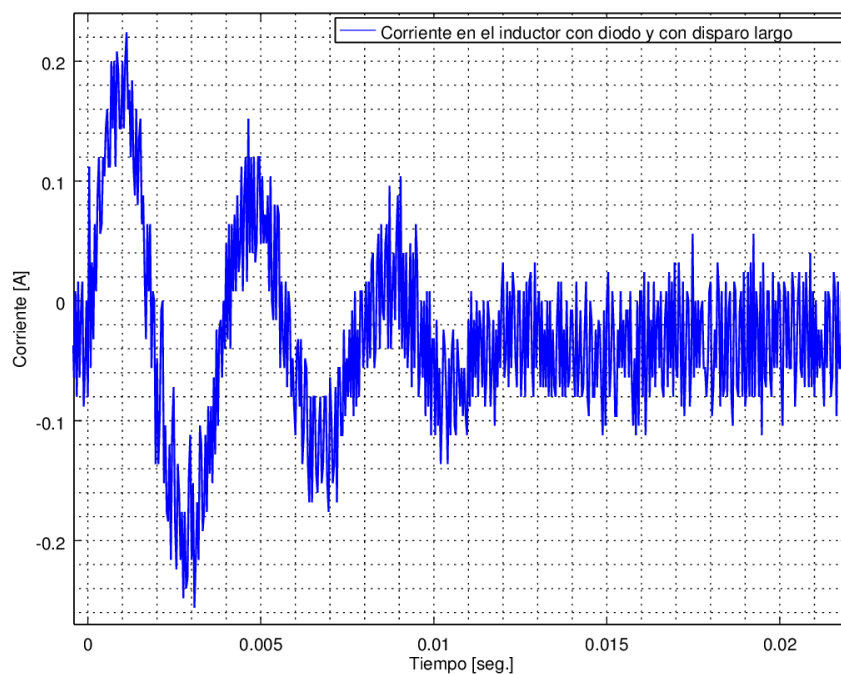


Figura 14: Corriente en el inductor respecto del terminal negativo de la fuente.

## 2.3. Análisis de resultados

- ¿Porqué se producen distintas formas de onda para cada una de las configuraciones medidas?

En la figura 10 (corriente sin diodo conectado, disparo corto) se puede apreciar que la señal termina en  $t \simeq 2$  ms, y en la figura 12 es en ese punto donde la corriente llega a cero. La corriente en el primer caso no puede seguir disminuyendo y volverse negativa por la presencia del tiristor, que se comporta como un diodo. Una vez que la corriente se extingue, el tiristor no volverá a conducir a menos que se le envíe un nuevo pulso al *Gate*. También se puede apreciar que la corriente no comienza a disminuir hasta que la tensión en el tiristor (figura 9) se vuelve negativa en  $t \simeq 0,5$  ms, lo que refleja una propiedad de los tiristores.

En las figuras 11 y 12 se puede ver como la señal de tensión en el inductor termina en  $t \simeq 3,8$  ms. En este punto la corriente que circulaba por el diodo no puede volver a circular por el tiristor ya que entró en corte cuando se extinguió la corriente que circula por el. Esto se debe a que la corriente de base del tiristor tiene una duración muy corta, por ende una vez que se extinga la corriente del tiristor no volverá a conducir dado que no habrá corriente de base que habilite su conducción.

En cambio en las figuras 13 y 14 se usó un disparo largo, y se puede observar que la señal continúa hasta extinguirse el transitorio. En este caso la señal usada para habilitar la conducción del tiristor tiene una duración mayor que la del transitorio. Entonces, la corriente que circulaba por el diodo puede circular por el tiristor sin impedimentos porque la señal de disparo sigue habilitando la conducción por el tiristor.

- ¿Porque para cargar el capacitor de  $4,7 \mu\text{F}$  alcanza con realizar un disparo corto?

Una vez disparado el tiristor, éste se mantendrá en conducción hasta que la corriente que lo atraviesa caiga por debajo de un valor mínimo “holding current”, para este caso  $I_H = 8$  mA. Una vez activada la conducción se trata de un circuito RC, en el cual la conducción se deshabilitará cuando la corriente caiga por debajo de  $I_H$ , pero esto no ocurrirá hasta que el capacitor se halla cargado casi en su totalidad. Por esto no es necesario que el disparo del tiristor sea largo, alcanza con un pulso lo suficientemente largo para habilitar la conducción en un primer instante.

### 3. Conclusiones

Al utilizar dispositivos de potencia es necesario conocer los requisitos que debe cumplir el dispositivo y dependiendo de si se requiere un dispositivo totalmente controlado como los IGBT o semicontrolado como los tiristores. Los tiristores al ser semicontrolados sólo dispone de control de la puesta en conducción. Los IGBT en cambio variando la tensión del *Gate* pueden controlar la corriente que circulan desde el *Colector* hacia el *Emisor*.

Hay que tener en cuenta al utilizar dispositivos de potencia el tiempo de activación. El tiempo necesario para conmutar el estado de un IGBT dependerá de la corriente que circula por su *Gate* hasta cargar su capacitor asociado y permitir la circulación de corriente que estará amplificada. En cambio los tiristores solo requieren una corriente muy baja para activarse y así permitir la circulación de corriente.

Al manejar corrientes más altas se debe contar con mecanismos de protección, como agregar inductores en serie para evitar saltos de corriente.

Se deben tener en cuenta las temperaturas que alcanzarán los dispositivos, ya que pueden llegar a temperaturas elevadas si disipan mucha potencia y así dañar el circuito.

En cuanto a los tiristores, el precio a pagar a cambio de un diodo de alta potencia es una notable pérdida en el control sobre su funcionamiento. También es necesaria la implementación de un circuito adicional para generar un pulso que active al tiristor.