



**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO**

**Colegio de Ciencias e Ingeniería**

**Optimización de conversor boost usando simulación en MATLAB**

**David Andrés Figueroa Salvador**

**Omar Aguirre, M.Sc., Director de Tesis**

Tesis de grado presentada como requisito  
para la obtención del título de Ingeniero Electrónico

Quito, mayo de 2015

**Universidad San Francisco de Quito**

**Colegio de Ciencias e Ingeniería**

**HOJA DE APROBACIÓN DE TESIS**

**Optimización de conversor boost usando simulación en MATLAB**

David Andrés Figueroa Salvador

Omar Aguirre, M.Sc.,  
Director de Tesis

---

Alberto Sánchez, Ph.D.,  
Miembro del Comité de Tesis

---

Diego Benitez, Ph.D.,  
Miembro del Comité de Tesis

---

Omar Aguirre, M.Sc.,  
Director del Programa

---

Ximena Córdova, Ph.D.,  
Decana de la Escuela de Ingeniería  
Colegio de Ciencias e Ingeniería

---

César Zambrano, Ph.D.,  
Decano de la Escuela de Ciencias  
Colegio de Ciencias e Ingeniería

---

**Quito, mayo de 2015**

## © DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído la Política de Propiedad Intelectual de la Universidad San Francisco de Quito y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo de investigación quedan sujetos a lo dispuesto en la Política.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo de investigación en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma: \_\_\_\_\_

Nombre: David Andrés Figueroa Salvador

C. I.: 1725803785

Lugar y fecha: Quito, mayo de 2015

## **DEDICATORIA**

A mi madre.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezo a mi madre, que siempre estuvo para apoyarme en este trayecto, a mis amigos que han estado cuando los he necesitado, además de a mis profesores que me han enseñado durante todo este camino hasta conseguir mi título.

## **RESUMEN**

Esta tesis se realizó de manera que se presenten resultados claros y concisos del funcionamiento de un sistema de conversión de energía eléctrica a partir de energía solar. En el trabajo, se simuló un sistema comprendido por una celda fotovoltaica, un controlador MPPT y un conversor boost intercalado, utilizando MATLAB con distintas cargas y con problemas en los interruptores.

Los resultados obtenidos de las simulaciones se analizan de manera que pueden identificarse problemas en el sistema y proponerse soluciones a los mismos.

## **ABSTRACT**

This work was made in a way where clear, concise data can be presented from solar to electric energy generator system point of view. In this work, a system composed of a photovoltaic cell, a MPPT controller and an interleaved boost converter was simulated using MATLAB, with different loads and problems in the switches.

The results from the simulations can be analyzed in a way where problems in the system can be identified and solutions can be proposed.



## TABLA DE CONTENIDO

<b>Resumen</b> .....	7
<b>Abstract</b> .....	8
<b>CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN</b> .....	12
<b>CAPÍTULO 2: REVISIÓN DE LITERATURA</b> .....	13
Conversor DC-DC .....	13
Conversor boost.....	13
Conversor boost intercalado .....	17
Conmutación dura y suave .....	18
Algoritmo 'Perturb & Observe' .....	19
Aplicaciones .....	20
<b>CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA</b> .....	22
Simulación .....	22
Diseño de la simulación.....	24
Procedimiento para la obtención de datos .....	23
Modelo simulado .....	24
<b>CAPÍTULO 4: RESULTADOS</b> .....	26
Detalle de las simulaciones.....	26
Prueba con carga resistiva .....	26
Prueba de circuito abierto .....	29
Prueba de cortocircuito .....	32
Prueba con carga RC en paralelo.....	34
Prueba con carga RC en serie .....	36
Prueba con carga RL en paralelo .....	38
Prueba con carga RL en serie .....	41
Prueba con carga RLC en paralelo .....	44
Prueba con carga RLC en serie.....	46
Prueba con carga de batería .....	49
Prueba con interruptor abierto .....	52
Prueba con interruptor cerrado .....	55
<b>CAPÍTULO 5: ANÁLISIS DE RESULTADOS</b> .....	57
<b>CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES</b> .....	60
<b>CAPÍTULO 7: RECOMENDACIONES</b> .....	62
<b>REFERENCIAS</b> .....	63

## TABLAS

Tabla 1: Valores de los componentes del IBC .....	25
---	----

## FIGURAS

Figura 1: Conversor boost (Sheperd & Zhang, 2014) .....	14
Figura 2: Conversor boost con interruptor ideal (Erickson & Maksimovic, 2000).....	14
Figura 3: Conversor boost con interruptor cerrado (Erickson & Maksimovic, 2000) .....	15
Figura 4: Voltaje en el inductor durante la primera parte del ciclo del interruptor (Erickson & Maksimovic, 2000) .....	15
Figura 5: Corriente en el capacitor durante la primera mitad del ciclo del interruptor (Erickson & Maksimovic, 2000) .....	16
Figura 6: Conversor boost con interruptor abierto (Erickson & Maksimovic, 2000) .....	16
Figura 7: Voltaje en el inductor en un ciclo completo de interruptor (Erickson & Maksimovic, 2000) .....	17
Figura 8: Corriente en el capacitor en un ciclo completo de interruptor (Erickson & Maksimovic, 2000) .....	17
Figura 9: Voltaje y corriente en el interruptor, voltaje de compuerta y potencia de pérdida (Ayyanar, Mohan, & Persson, 2002) .....	18
Figura 10: Diagrama de bloques a ser implementado (Kavitha, Rajan, & Vengatesh, 2014) .....	23
Figura 11: Modelo simulado.....	24
Figura 12: Voltaje de compuerta de cada interruptor .....	26
Figura 13: Potencia de entrada y salida .....	27
Figura 14: Voltaje de entrada y salida .....	27
Figura 15: Corriente de entrada y salida.....	28
Figura 16: Rizado de potencia de entrada y salida .....	29
Figura 17: Voltaje de compuerta de cada interruptor .....	30
Figura 18: Potencia de entrada y salida .....	30
Figura 19: Voltaje de entrada y salida .....	31
Figura 20: Corriente de entrada y salida.....	31
Figura 21: Voltaje de compuerta de cada interruptor .....	32
Figura 22: Potencia de entrada y salida .....	32
Figura 23: Voltaje de entrada y salida .....	33
Figura 24: Corriente de entrada y salida.....	33
Figura 25: Voltaje de compuerta de cada interruptor .....	324
Figura 26: Potencia de entrada y salida .....	34
Figura 27: Voltaje de entrada y salida .....	35
Figura 28: Corriente de entrada y salida.....	35
Figura 29: Voltaje de compuerta de cada interruptor .....	36
Figura 30: Potencia de entrada y salida .....	36
Figura 31: Voltaje de entrada y salida .....	37
Figura 32: Corriente de entrada y salida.....	37

Figura 33: Rizado de potencia de entrada y salida .....	38
Figura 34: Voltaje de compuerta de cada interruptor .....	39
Figura 35: Potencia de entrada y salida .....	39
Figura 36: Voltaje de entrada y salida .....	40
Figura 37: Corriente de entrada y salida.....	40
Figura 38: Rizado de potencia de entrada y salida .....	41
Figura 39: Voltaje de compuerta de cada interruptor .....	42
Figura 40: Potencia de entrada y salida .....	42
Figura 41: Voltaje de entrada y salida .....	43
Figura 42: Corriente de entrada y salida.....	43
Figura 43: Voltaje de compuerta de cada interruptor .....	44
Figura 44: Potencia de entrada y salida .....	44
Figura 45: Voltaje de entrada y salida .....	45
Figura 46: Corriente de entrada y salida.....	45
Figura 47: Rizado de potencia de entrada y salida .....	46
Figura 48: Voltaje de compuerta de cada interruptor .....	47
Figura 49: Potencia de entrada y salida .....	47
Figura 50: Voltaje de entrada y salida .....	48
Figura 51: Corriente de entrada y salida.....	48
Figura 52: Rizado de potencia de entrada y salida .....	49
Figura 53: Voltaje de compuerta de cada interruptor .....	50
Figura 54: Potencia de entrada y salida .....	50
Figura 55: Voltaje de entrada y salida .....	51
Figura 56: Corriente de entrada y salida.....	51
Figura 57: Rizado de potencia de entrada y salida .....	52
Figura 58: Voltaje de compuerta de cada interruptor .....	52
Figura 59: Potencia de entrada y salida .....	53
Figura 60: Voltaje de entrada y salida .....	54
Figura 61: Corriente de entrada y salida.....	54
Figura 62: Voltaje de compuerta de cada interruptor .....	55
Figura 63: Potencia de entrada y salida .....	55
Figura 64: Voltaje de entrada y salida .....	56
Figura 65: Corriente de entrada y salida.....	56

## CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

El presente trabajo pretende analizar el funcionamiento de un convertor DC-DC, el convertor boost intercalado, ante situaciones donde el funcionamiento ideal se ve afectado, de manera que puedan sugerirse optimizaciones en el convertor para que éste tenga un funcionamiento adecuado en situaciones inesperadas.

La manera en la que se realiza el análisis es a través de simulación en MATLAB, utilizando la herramienta Simulink, para observar el comportamiento que debe tener el convertor ante diversas situaciones y proponer optimizaciones al sistema.

Las fuentes bibliográficas utilizadas fueron obtenidas de diversas revistas científicas, además de libros académicos relacionados con el tema.

La necesidad de energía eléctrica en lugares aislados, además de la creciente popularidad de la energía alternativa, han hecho que la energía solar tome una importancia notable. Es importante tener equipos de alta eficiencia al convertir energía solar en energía eléctrica, ya que pérdidas excesivas resultan en una baja capacidad de uso de la energía, lo que convierte en inútil el sentido de la energía alternativa. Ante este problema, resulta indispensable diseñar convertidores con un rendimiento óptimo para lograr obtener la mayor cantidad de energía útil. El presente trabajo pretende explorar una metodología del diseño de un sistema de conversión de energía y la optimización del mismo a través de simulación.

## **CAPÍTULO 2: REVISIÓN DE LA LITERATURA**

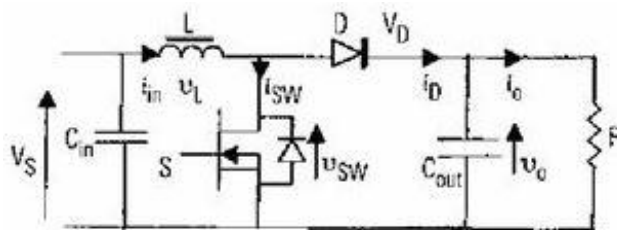
La cada vez más creciente demanda de energía en los últimos años ha llevado a encontrarnos con problemas con el abastecimiento constante. El mundo moderno no puede concebirse sin energía, en especial sin energía eléctrica. De aquí surgen temas sumamente estudiados, el estudio de la conservación de energía y la necesidad de equipos robustos en funcionamiento. Por variadas razones, suelen requerirse cambios en ciertos parámetros de la energía eléctrica. Se hacen cambios que aumentan el voltaje para utilizar la energía, se disminuye el voltaje para transportar la energía, etc. Muchas veces, es posible realizar cambios en parámetros de energía eléctrica pero a costa de pérdidas sumamente grandes en la potencia. De aquí nace la necesidad de los convertidores. A continuación, se habla sobre algunos temas de interés que se relacionan con la presente investigación.

### **Convertidor DC-DC**

Existe una gran ambigüedad en cuánto a qué es un convertidor DC-DC. Varios autores definen los convertidores de este tipo de manera distinta, centrandos sus esfuerzos en distintos aspectos del proceso de conversión. Algunos hablan de controlabilidad, otros de cómo deben ser los componentes y etc. Conviene a este estudio adoptar la definición de que un convertidor DC-DC es un circuito cuya principal característica es convertir un voltaje DC en sus terminales de entrada a un voltaje DC en sus terminales de salida (van Breussegem & Steyaert, 2012).

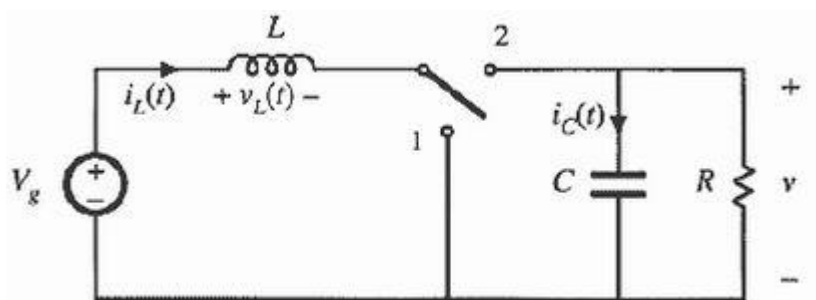
### **Convertidor boost**

Un modelo simple del convertidor boost puede observarse en la figura 1.



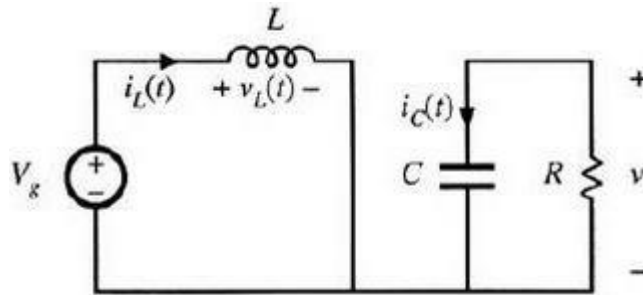
**Figura 1: Conversor boost (Sheperd & Zhang, 2014)**

Este conversor se caracteriza por tener una salida de voltaje mayor en magnitud al voltaje de entrada. Este conversor utiliza un interruptor para su funcionamiento, que puede modelarse con un MOSFET y un diodo. Para explicar el funcionamiento del conversor, se asume que el interruptor es ideal, por lo que el sistema que se obtiene es igual al de la figura 2.



**Figura 2: Conversor boost con interruptor ideal (Erickson & Maksimovic, 2000)**

Cuando el interruptor se encuentra en la posición 1, es decir, cuando el interruptor está cerrado, el inductor está conectado al lado positivo y negativo de la fuente, de manera que se obtiene el circuito de la figura 3.



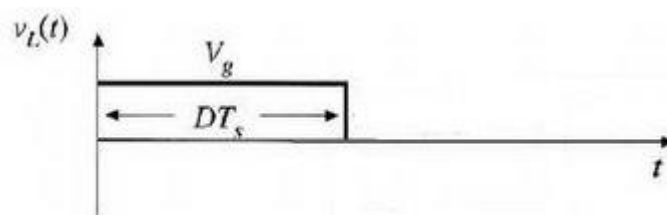
**Figura 3: Conversor boost con interruptor cerrado (Erickson & Maksimovic, 2000)**

En este estado, el inductor se carga mientras el capacitor de salida proporciona la energía que tiene almacenada a la resistencia de carga. En este estado, si asumimos un rizado pequeño, utilizando leyes de Kirchoff, podemos decir que el voltaje en el inductor y la corriente en el capacitor son:

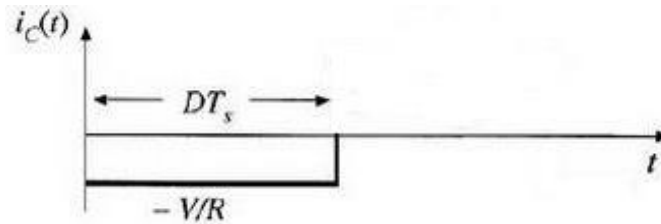
$$v_L = V_g$$

$$i_C = -\frac{v}{R}$$

Utilizando estas ecuaciones, se puede realizar un breve bosquejo de cómo se comportan voltaje y corriente durante la primera parte del ciclo del interruptor, como muestran las figuras 4 y 5, donde  $D$  simboliza el tiempo durante el cual el interruptor permanece en esta posición.



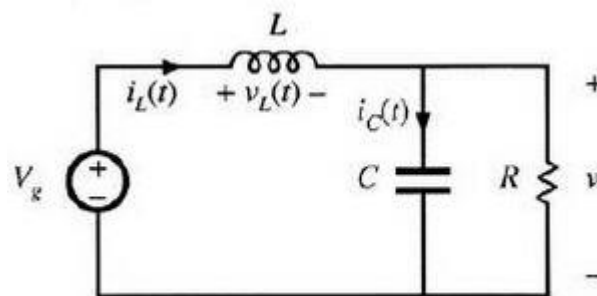
**Figura 4: Voltaje en el inductor durante la primera parte del ciclo del interruptor (Erickson & Maksimovic, 2000)**



**Figura 5: Corriente en el capacitor durante la primera mitad del ciclo del interruptor (Erickson & Maksimovic, 2000)**

Es fácil notar que el voltaje del inductor es positivo, dado que se encuentra en fase de carga, y este voltaje es igual al voltaje de la fuente. De igual manera, puede notarse que la corriente en el capacitor es negativa debido a que el capacitor se encuentra descargado su energía al a carga.

Entonces el interruptor se abre y da lugar a un circuito como el que se muestra en la figura 6.



**Figura 6: Conversor boost con interruptor abierto (Erickson & Maksimovic, 2000)**

Aquí, el inductor proporciona energía a tanto el capacitor de salida como a la carga, de manera que el capacitor vuelve a almacenar energía para cuando el interruptor cambie de estado y energice nuevamente el inductor. Nuevamente, utilizando leyes de Kirchhoff, se pueden obtener corriente en el capacitor y voltaje en el inductor, siendo estas:

$$v_L = V_g - v$$

$$i_C = i_L - \frac{v}{R}$$

Completando los bosquejos de voltaje y corriente en el inductor y capacitor respectivamente, se obtienen las figuras 7 y 8.



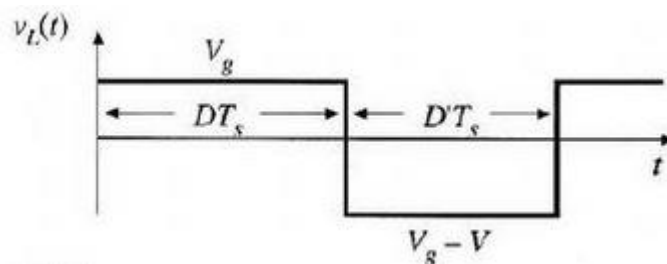


Figura 7: Voltaje en el inductor en un ciclo completo de interruptor (Erickson & Maksimovic, 2000)

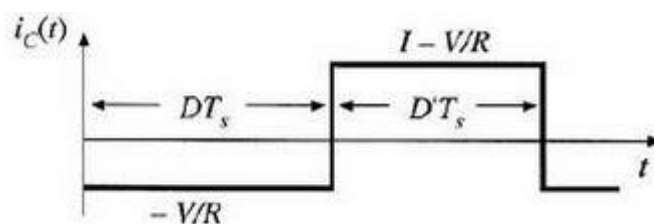


Figura 8: Corriente en el capacitor en un ciclo completo de interruptor (Erickson & Maksimovic, 2000)

Dado que los componentes inductivos y capacitivos son no disipativos, ya que se asumen sin resistencia o con una resistencia tan baja que las pérdidas son despreciables, al final de un ciclo entero la energía almacenada en el inductor debe ser igual a la energía que entregó el mismo, de manera que el área bajo la curva que se muestra en la figura 7 debe ser cero, razón por la cual  $V_g - V$  es necesariamente negativo. De aquí, puede notarse que  $V$  debe ser mayor que  $V_g$ , por lo cual se sabe que el voltaje de salida es mayor al voltaje de entrada (Erickson & Maksimovic, 2000).

### Convertor boost intercalado

Para mejorar la eficiencia del convertor, se utilizan  $n$  convertidores boost intercalados, en el caso de este estudio,  $n$  es igual a 2. Estos convertidores deben desfasarse en  $360^\circ/n$  en su conmutación, de manera que con  $n$  igual a 2, los convertidores se desfasan en  $180^\circ$ . Esto ayuda reduciendo el rizado en la corriente de entrada que se presenta en los inductores, al igual que el rizado que se presenta en la corriente de salida del convertor. De

igual manera, se alcanza una eficiencia mayor al dividir la corriente de salida en dos caminos, reduciendo las pérdidas que se producen por resistencia en la salida y por frecuencia de conmutación en los inductores (Crews, 2008).

### Conmutación dura y suave

Ya que los componentes usados no son ideales, existen momentos de la conmutación donde los interruptores tienen pérdidas de potencia. Dado que se utiliza un MOSFET para realizar la conmutación, las no idealidades del componente hacen que al haber un cambio en el voltaje de compuerta, el cambio en voltaje y corriente no cambien de manera inmediata, lo que lleva a pérdidas grandes en sistemas de alta potencia. La figura 9 muestra este problema de conmutación.

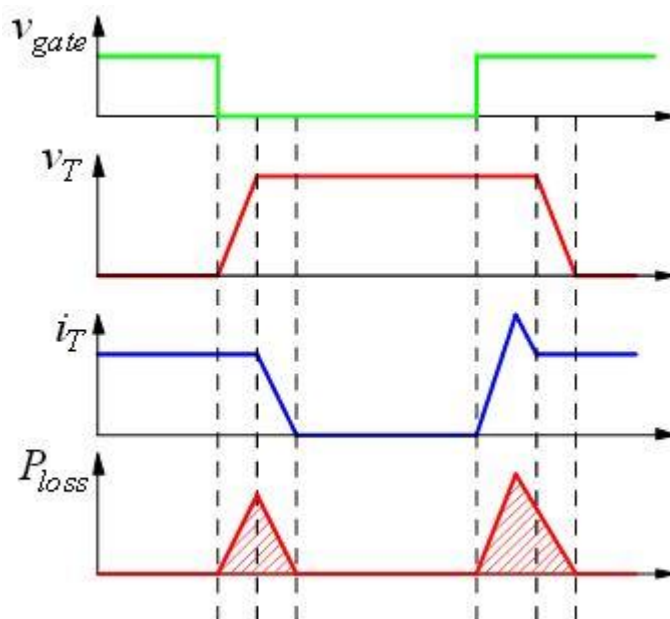


Figura 9: Voltaje y corriente en el interruptor, voltaje de compuerta y potencia de pérdida (Ayyanar, Mohan, & Persson, 2002)

Puede apreciarse que al haber un cambio en el voltaje de compuerta, toma un tiempo para que el voltaje y la corriente lleguen a su estado estable. La mayoría del

tiempo, al ser cero voltaje o corriente, no existen pérdidas, pero durante este estado transitorio en el que ambos valores tienen un valor positivo, existen pérdidas. Este es uno de los problemas que presenta la conmutación dura, ya que además de la pérdida de energía en sí, esta energía perdida se transforma en calor y puede traer problemas al circuito.

Para lidiar con este problema existen varias alternativas. La que interesa más en este estudio es lograr una conmutación suave por medio de técnicas ‘Zero Current Switching’ (ZCS) y ‘Zero Voltage Switching’ (ZVS). Esto se logra por medio de acoplar inductores y capacitores en el circuito con el fin de controlar la corriente y el voltaje al momento de la conmutación. Así, en condición de ZCS, la corriente a través del MOSFET es cero y en condición de ZVS el voltaje pasa a ser cero. Las ventajas de estas técnicas son que reducen el rizado de la corriente de entrada, pérdidas por conmutación, rizado de voltaje de salida y reduce el tamaño de los componentes pasivos (Kavitha, Rajan, & Vengatesh, 2014). Para utilizar estas técnicas, los interruptores se cambian a posición de encendido cuando la corriente es cero y en posición de apagado cuando el voltaje es cero.

### **Algoritmo ‘Perturb & Observe’**

El convertidor boost intercalado suele acompañarse de controladores que el ciclo de trabajo del voltaje de compuerta del MOSFET que realiza la conmutación. Cuando el convertidor se utiliza en un sistema de energía fotovoltaico, por lo general tiene por controlador un bloque que implementa el algoritmo ‘Perturb & Observe’.

Este algoritmo es ampliamente utilizado dado que requiere solamente un lazo de retroalimentación y pocas medidas. El algoritmo funciona realizando una perturbación

deliberada, es decir, incrementa o disminuye el voltaje de entrada, y la potencia obtenida se compara a la potencia obtenida antes de la perturbación. Si al aumentar el voltaje, la potencia aumenta, se procede a una siguiente perturbación que aumente el voltaje. Si al aumentar el voltaje, la potencia disminuye, la siguiente perturbación será disminuir el voltaje (Rekioua & Matagne, 2012). De esta manera, se realiza el seguimiento del punto máximo de potencia (MPPT) al que debe operar el convertidor. El problema principal que presenta este método es que el punto de operación oscila alrededor del punto máximo de potencia al llegar al estado estable. Este algoritmo se utiliza cuando existe una curva I-V no lineal (Femia, Petrone, Spagnuolo, & Vitelli, 2012).

### **Aplicaciones**

Las aplicaciones del sistema conformado por el convertidor boost intercalado con un controlador que utiliza el algoritmo 'Perturb & Observe' son en general aplicaciones que implican generación de energía con celdas fotovoltaicas. Su bajo costo y facilidad de implementación hacen que sea ampliamente utilizado en obtención de energía solar (Rohini, Abirami, & Ramprakash, 2013).

Ya que este tipo de sistemas se utiliza principalmente para la obtención de energía, suele utilizarse en hogares y comunidades aisladas (Juanicó, 2010). Como la energía obtenida por los paneles fotovoltaicos varía con muchos factores ambientales, existen ocasiones donde la energía que se provee es mayor a la que se consume, por lo que se utilizan baterías para almacenar energía que será usada en momentos donde la demanda sea mayor que la energía generada. De igual manera, el sistema fotovoltaico puede conectarse a la red nacional de energía, con la complicación de requerir un sistema de conversión DC-AC para lograr dicha conexión (Teodorescu, 2010).

Por su capacidad de operar como un sistema independiente, tiene uso en situaciones donde energía es necesaria y no existen fuentes aparte del Sol, como es el caso de aparatos espaciales como satélites o trasbordadores. Es por esto que instituciones como la NASA se encuentran realizando investigaciones en paneles solares y estructuras de potencia asociadas para uso en sus diseños (program & council, 208).

## CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA

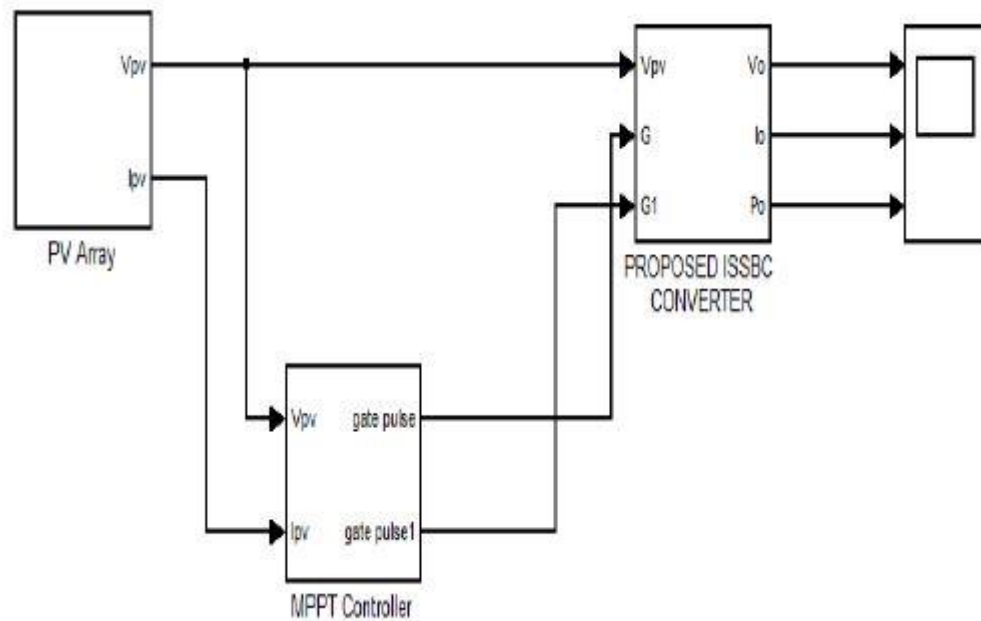
### **Simulación**

Dado que el objetivo de este trabajo es observar el comportamiento del IBC en condiciones no deseadas, se utilizó simulación utilizando MATLAB con su herramienta Simulink para observar estos comportamientos bajo condiciones proporcionadas, ya que esto permite observar un comportamiento cercano al real. Se escoge simulación por computadora por la no linealidad del sistema y por la cantidad de cálculos necesarios para obtener una respuesta.

Para observar el comportamiento no deseado del IBC en una celda fotovoltaica, se realizaron varias pruebas donde se utilizaron distintas cargas y, utilizando una carga resistiva, se mantuvo un interruptor todo el tiempo abierto o cerrado.

### **Diseño de la simulación**

Para obtener un sistema que pueda ser analizado satisfactoriamente, se requiere de un modelo donde se simule una celda fotovoltaica, su controlador MPPT utilizando el algoritmo 'Perturb & Observe' y el IBC conectado a una carga, tal como se muestra en la figura 10.



**Figura 10: Diagrama de bloques a ser implementado (Kavitha, Rajan, & Vengatesh, 2014)**

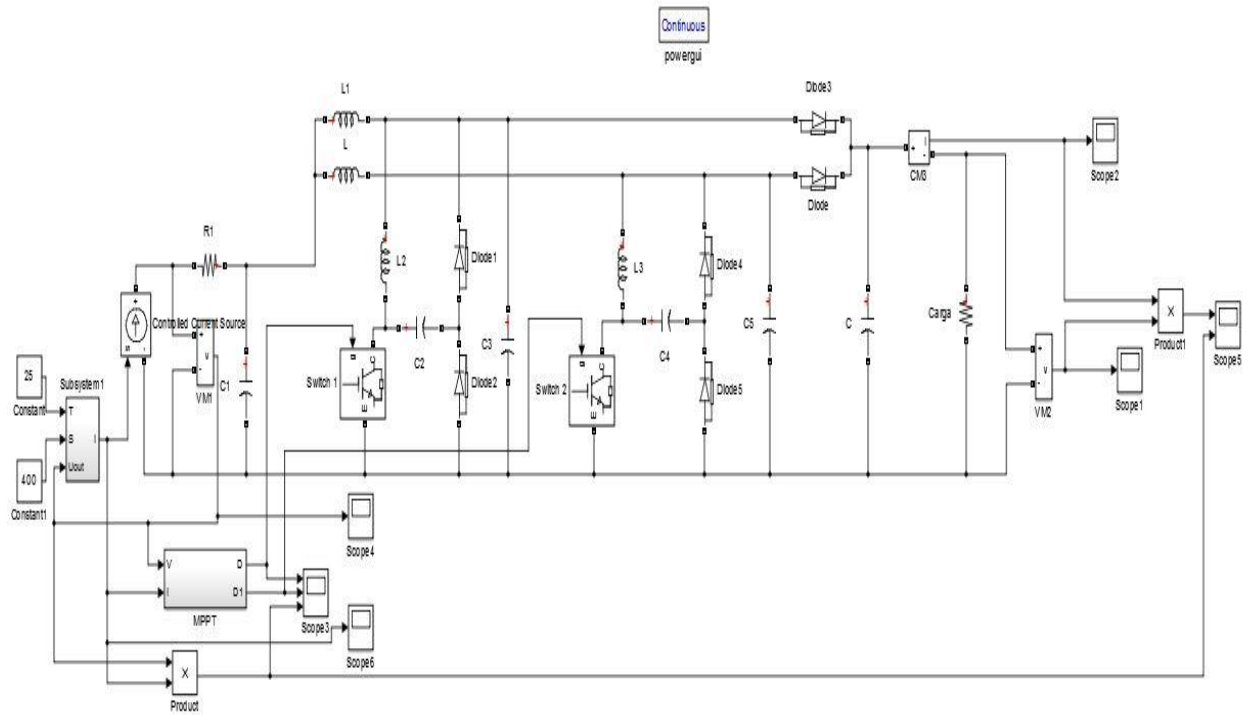
Para esto, se adaptaron 2 modelos. Se utilizó un modelo de celda fotovoltaica con su controlador MPPT realizado por Siva Ganesh Malla, del IIT Behubaneswar en India, y se creó el IBC en base al modelo proporcionado por Kavitha, Rajan & Vengatesh (Kavitha, Rajan, & Vengatesh, 2014) modificando los valores de los componentes de manera que se adapten mejor al modelo de entrada de Malla.

### **Procedimiento para la obtención de datos**

Una vez construido el modelo en Simulink, se procedió a realizar la simulación y a observar potencia, voltaje y corriente tanto de entrada como de salida del IBC. A esto se le agrega la obtención de los datos del voltaje de compuerta proporcionados por el controlador MPPT para confirmar un lazo de control efectivo que entregue la máxima potencia de la celda fotovoltaica.

## Modelo simulado

El modelo utilizado en las simulaciones se muestra en la figura 11.



**Figura 11: Modelo simulado**

Este modelo se utilizó para todas las simulaciones, cambiando el parámetro indicado como 'carga' por la carga requerida en cada prueba y cambiando el voltaje de compuerta en las pruebas donde los voltajes del interruptor 2 son tomados como constantes. La tabla 1 muestra los valores utilizados para el sistema.



**Tabla 1: Valores de los componentes del IBC**

<b>Parámetro</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Valor</b>
<b>Inductor Principal</b>	L, L1	0.01 [H]
<b>Inductor Resonante</b>	L2, L3	50 [mH]
<b>Capacitor Resonante</b>	C3, C5	100 [nF]
<b>Capacitor Auxiliar</b>	C2, C4	10 [nF]
<b>Capacitor de salida</b>	C	2 [mF]
<b>Resistencia de entrada</b>	R1	1 $\Omega$
<b>Capacitor de entrada</b>	C1	2 [mF]

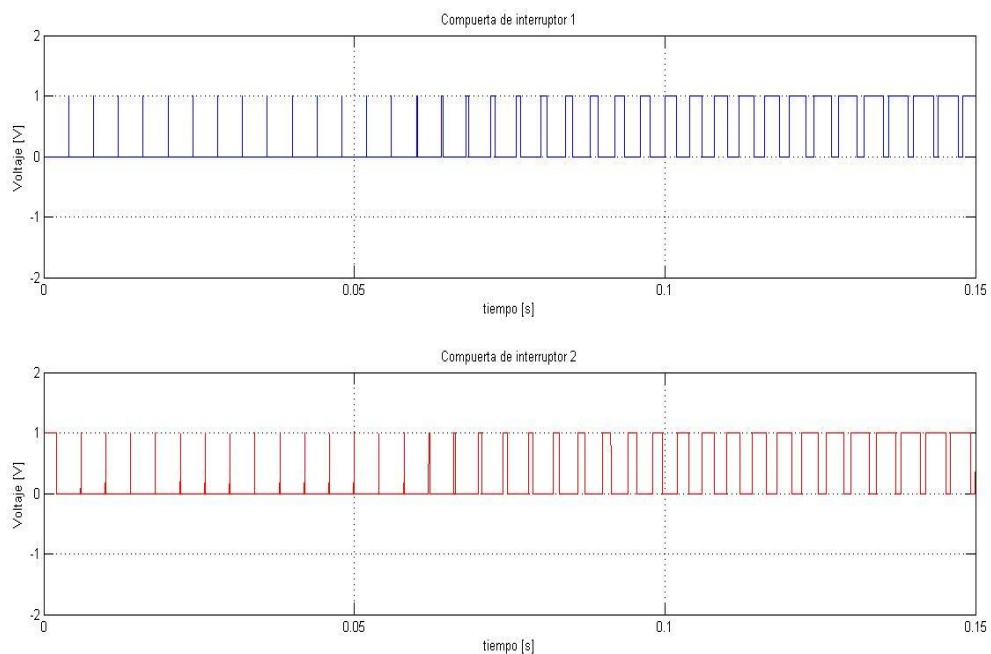
## CAPÍTULO 4: RESULTADOS

### Detalle de las simulaciones

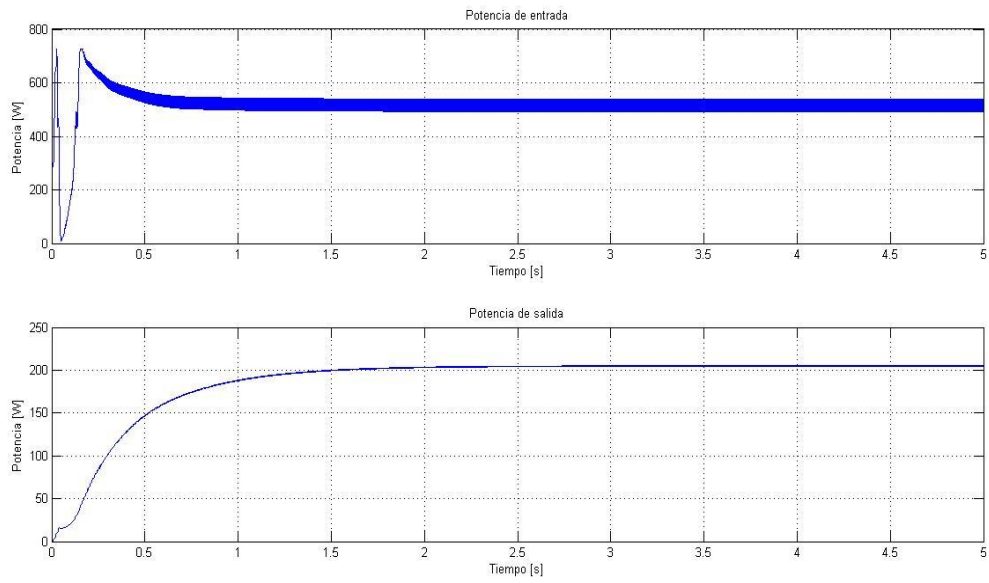
A continuación se presentan las distintas simulaciones realizadas con sus respectivas entradas y salidas de potencia, voltaje, corriente y su entrada de voltaje de compuerta.

### Prueba con carga resistiva

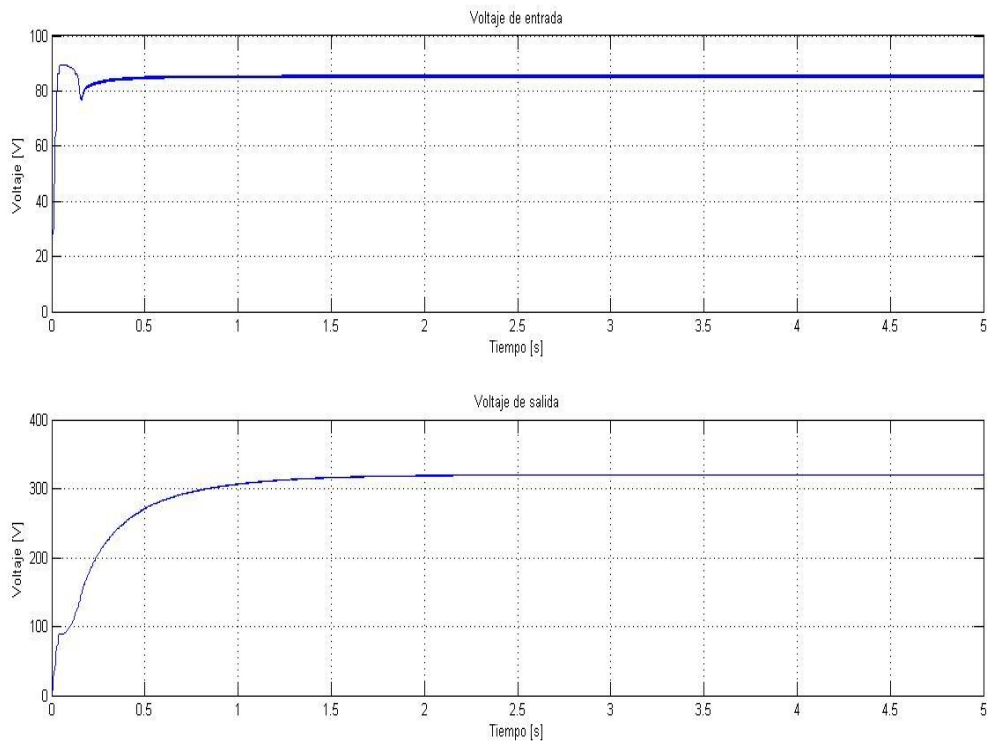
En las figuras 12, 13 ,14 y 15 se muestran voltaje de compuerta de cada interruptor, potencia de entrada y salida, voltaje de entrada y salida y corriente de entrada y salida respectivamente. La carga utilizada es de 500  $\Omega$ .



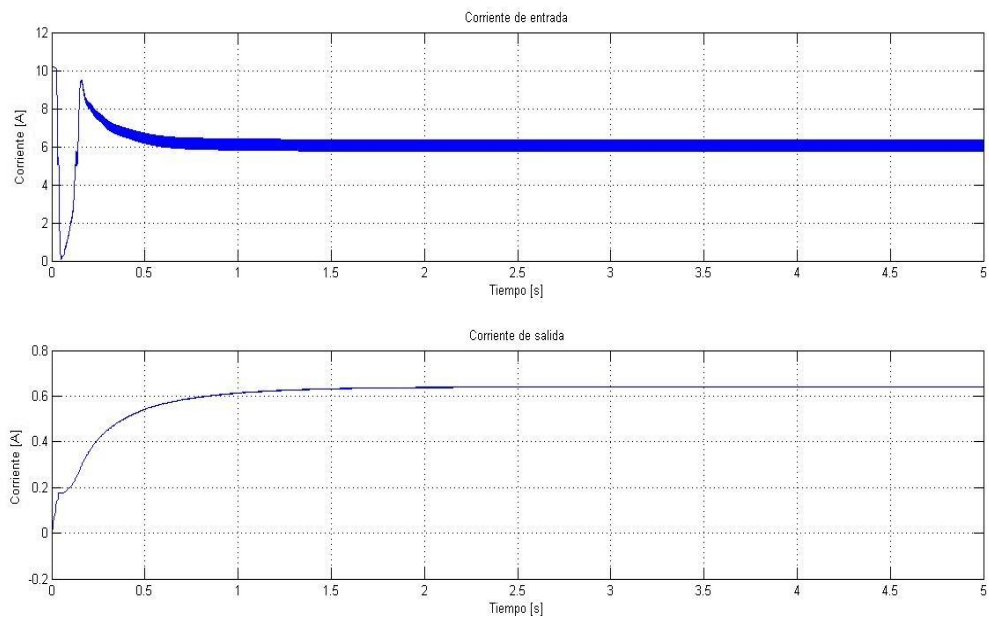
**Figura 12: Voltaje de compuerta de cada interruptor**



**Figura 13: Potencia de entrada y salida**

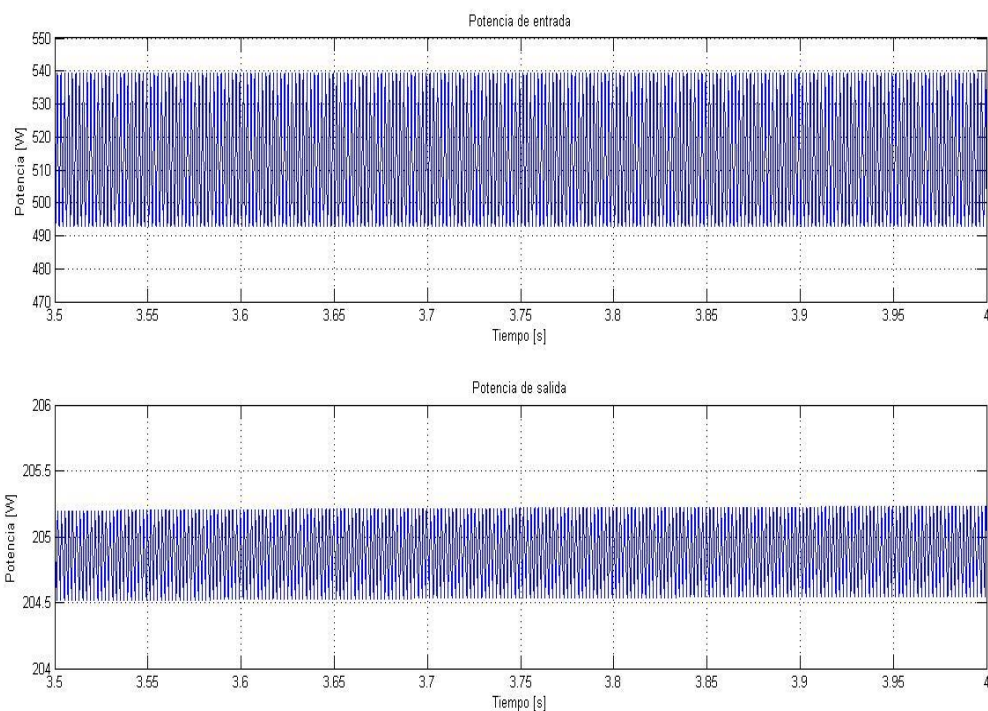


**Figura 14: Voltaje de entrada y salida**



**Figura 15: Corriente de entrada y salida**

Realizando un acercamiento a la figura 13 puede observarse el rizado en la potencia. Observando los puntos máximos y mínimos de cada potencia, se obtiene el punto medio y qué tanto rizado existe. Esto se puede observar en la figura 16.

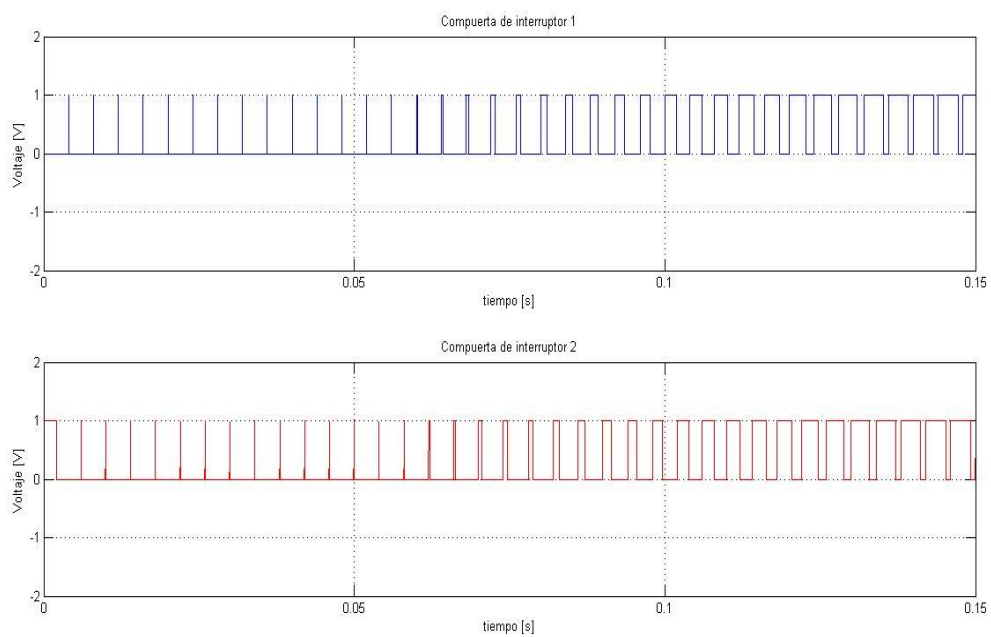


**Figura 16: Rizado de potencia de entrada y salida**

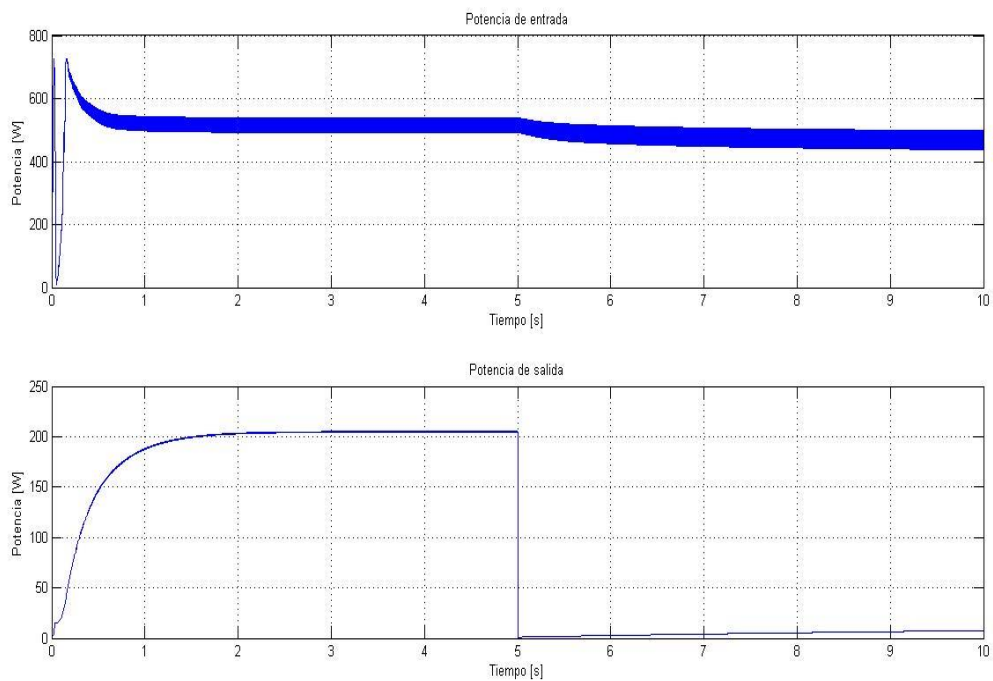
La potencia de entrada oscila alrededor de 516.15 W y la potencia de salida alrededor de 204.85 W, por lo que la eficiencia es de 39.69%. El rizado pico a pico de la potencia de entrada es de 46.3 W y de 0.7 W en la salida.

### **Prueba de circuito abierto**

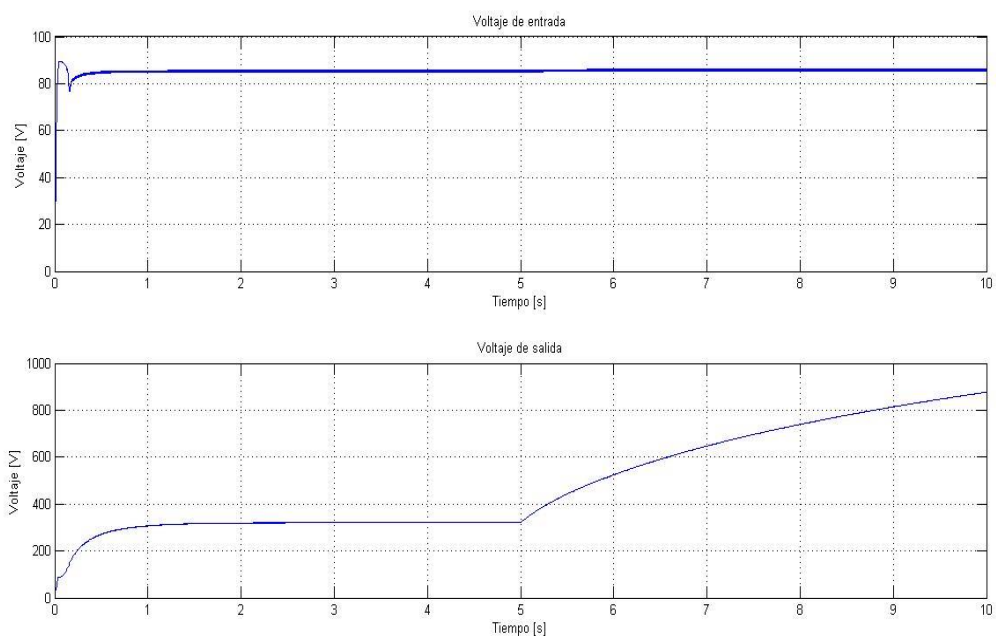
En las figuras 17, 18, 19 y 20 se muestran voltaje de compuerta de cada interruptor, potencia de entrada y salida, voltaje de entrada y salida y corriente de entrada y salida respectivamente. En la prueba de circuito abierto, donde se dejaron pasar 5 segundos de la simulación en condiciones óptimas y luego se utilizó un interruptor para simular que se desconecta la carga.



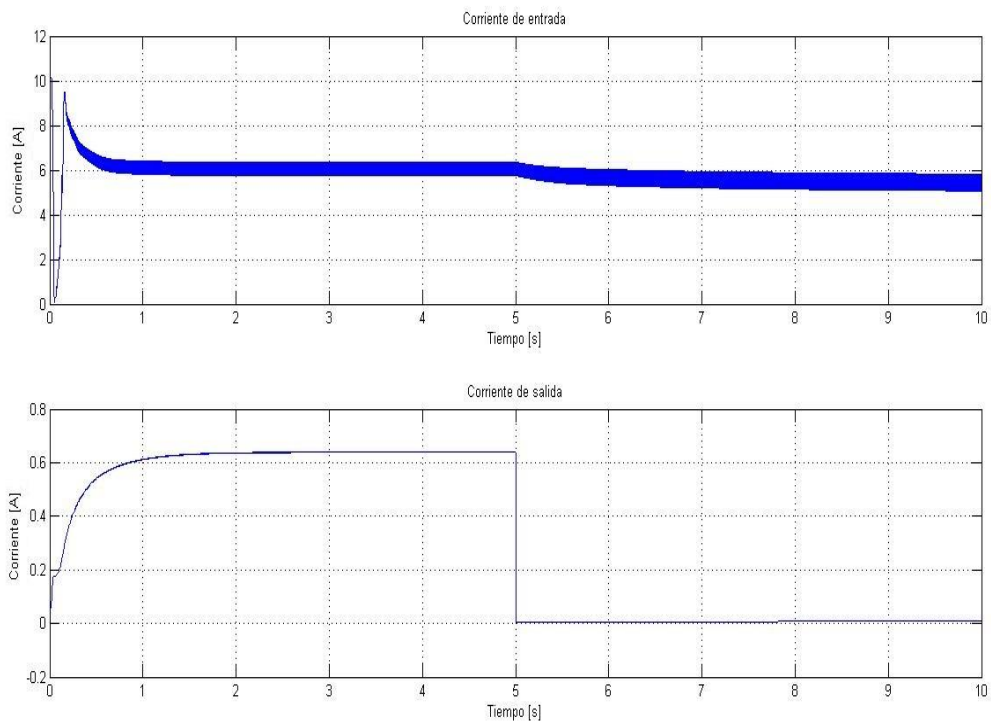
**Figura 17: Voltaje de compuerta de cada interruptor**



**Figura 18: Potencia de entrada y salida**



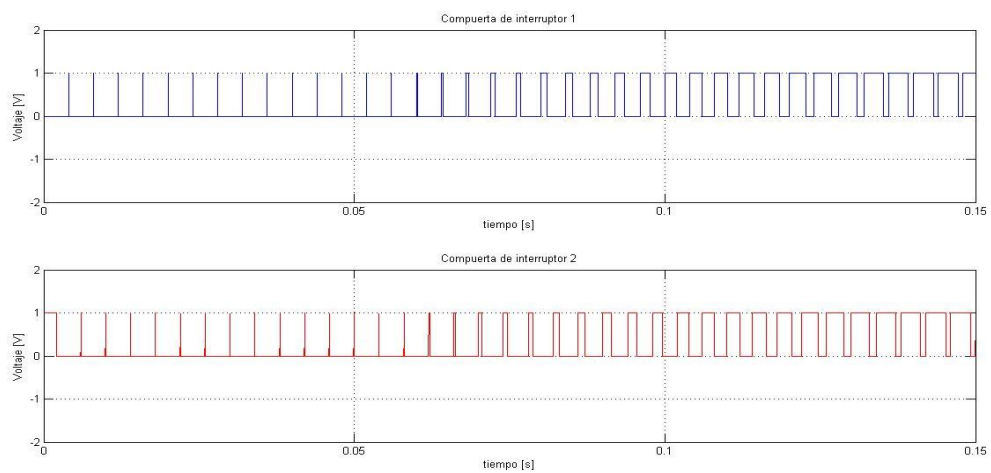
**Figura 19: Voltaje de entrada y salida**



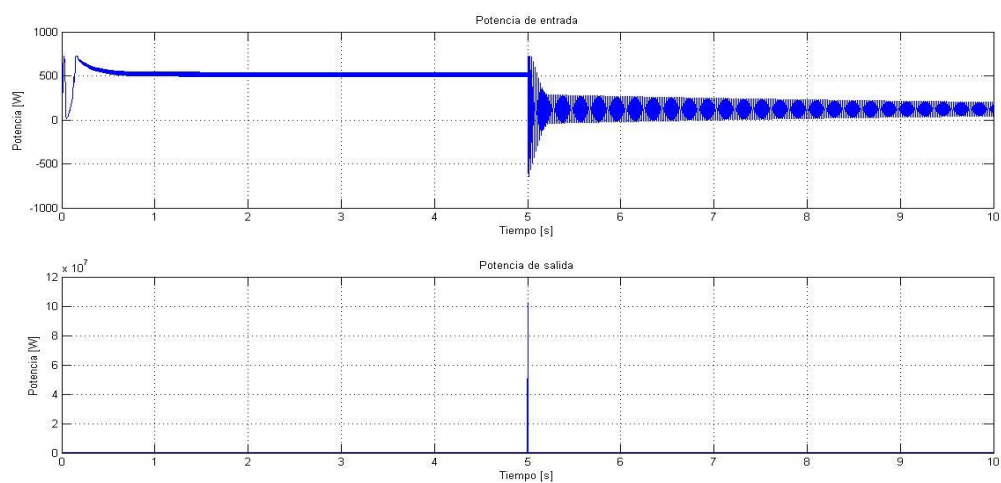
**Figura 20: Corriente de entrada y salida**

## Prueba de cortocircuito

En las figuras 21, 22, 23 y 24 se muestran voltaje de compuerta de cada interruptor, potencia de entrada y salida, voltaje de entrada y salida y corriente de entrada y salida respectivamente. Al igual que la prueba de circuito abierto, se mantiene el sistema en condiciones óptimas y luego de 5 segundos se activa un interruptor que simula un cortocircuito.

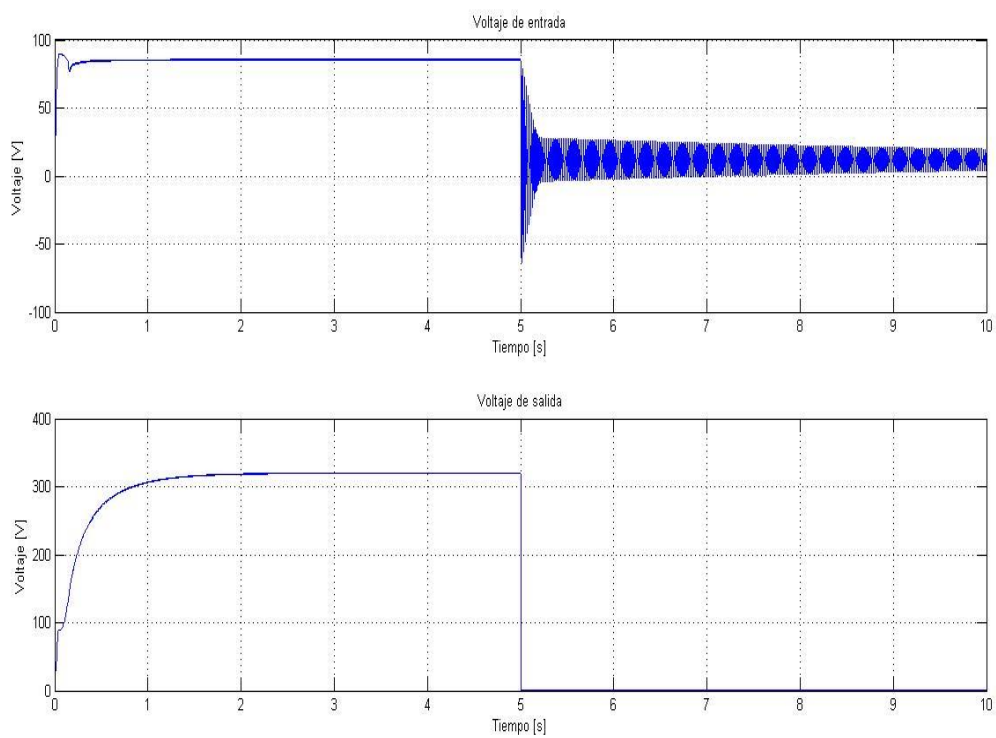


**Figura 21: Voltaje de compuerta de cada interruptor**

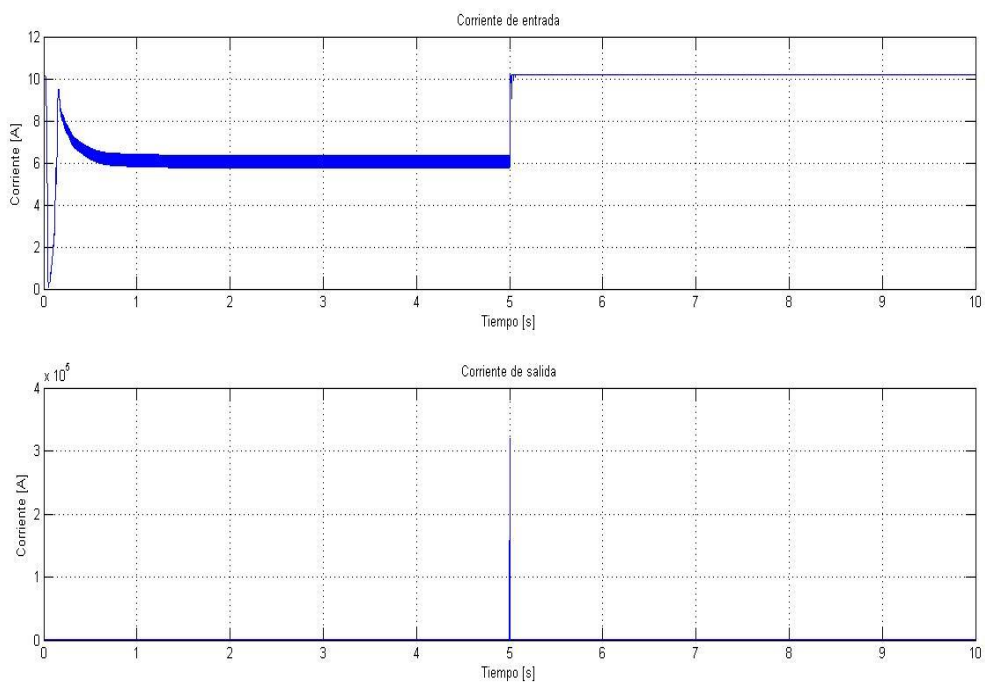


**Figura 22: Potencia de entrada y salida**





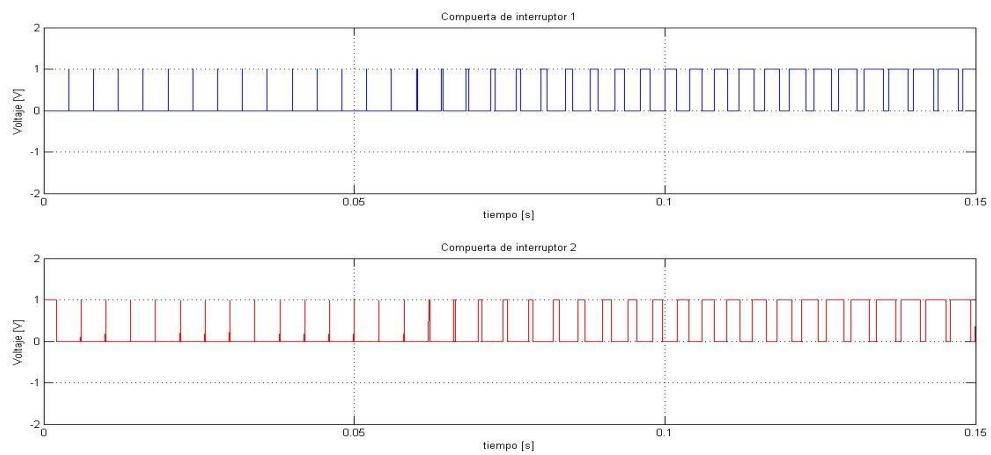
**Figura 23: Voltaje de entrada y salida**



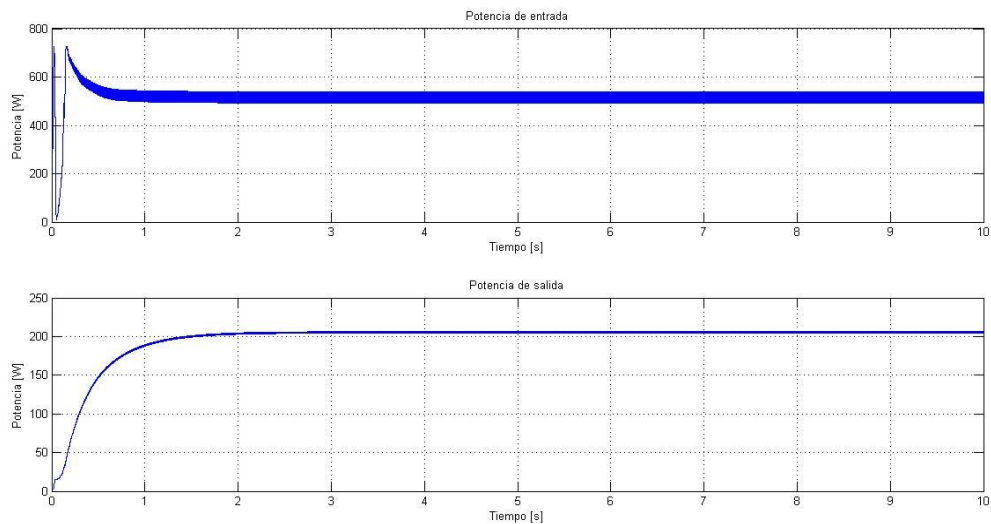
**Figura 24: Corriente de entrada y salida**

## Prueba con carga RC en paralelo

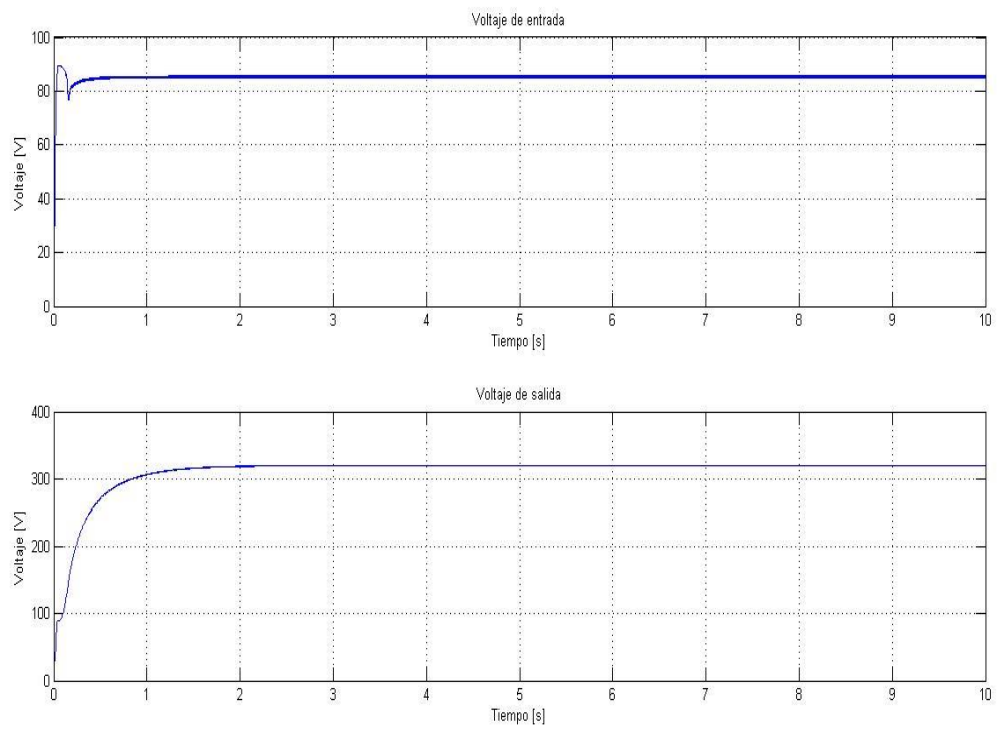
En las figuras 25, 26, 27 y 28 se muestran voltaje de compuerta de cada interruptor, potencia de entrada y salida, voltaje de entrada y salida y corriente de entrada y salida respectivamente. En este caso, se conectó en paralelo a la resistencia de carga de  $500 \Omega$  una capacitancia de  $1 \mu\text{F}$ .



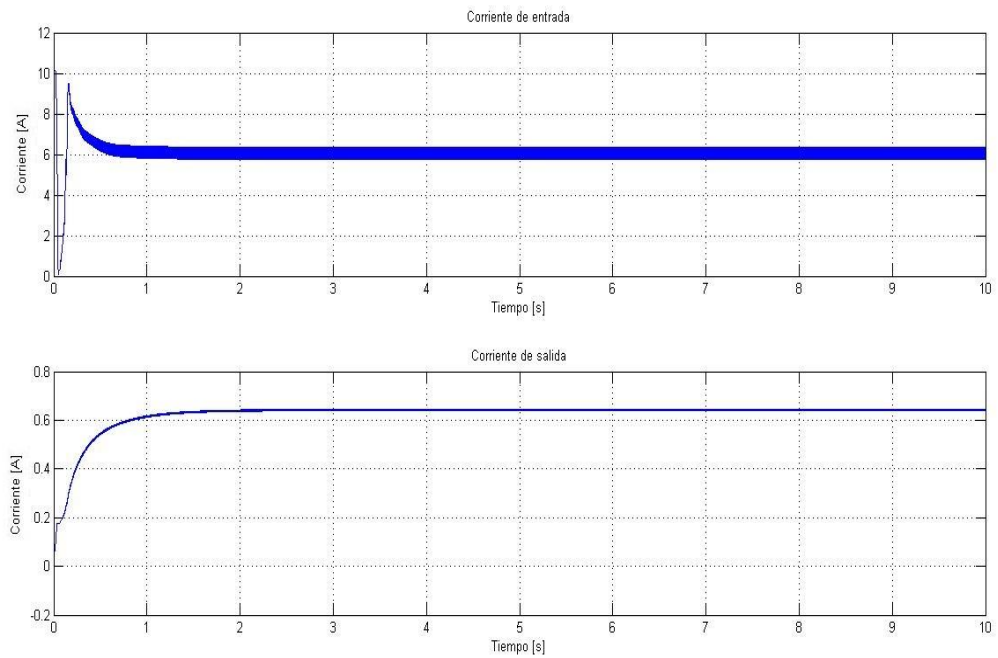
**Figura 25: Voltaje de compuerta de cada interruptor**



**Figura 26: Potencia de entrada y salida**



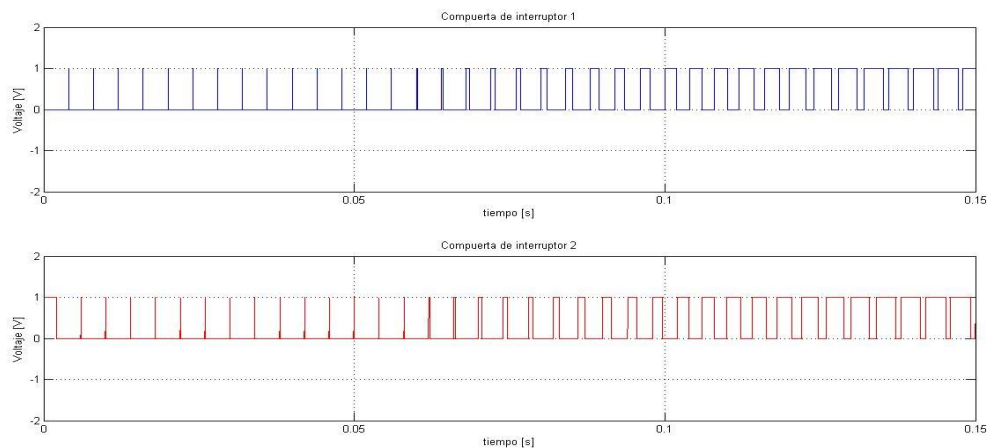
**Figura 27: Voltaje de entrada y salida**



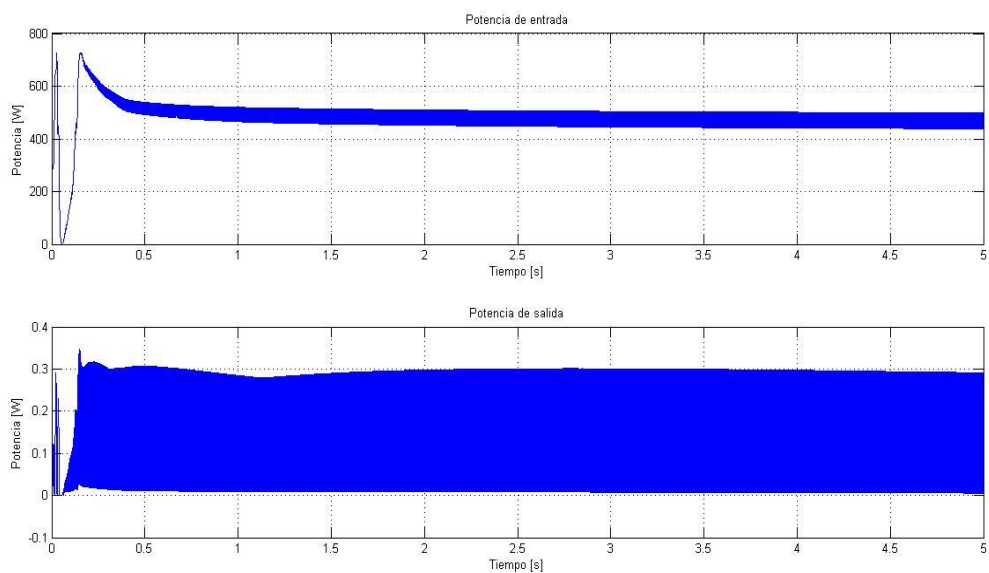
**Figura 28: Corriente de entrada y salida**

## Prueba con carga RC en serie

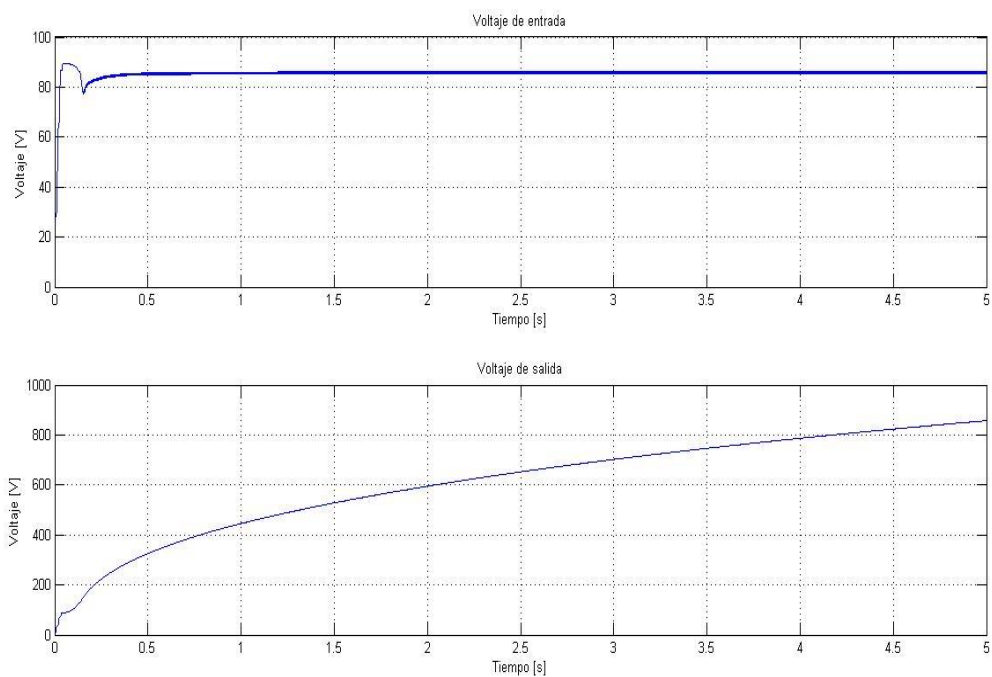
En las figuras 29, 30, 31 y 32 se muestran voltaje de compuerta de cada interruptor, potencia de entrada y salida, voltaje de entrada y salida y corriente de entrada y salida respectivamente. En este caso, se conectó en serie a la resistencia de carga de  $500\ \Omega$  una capacitancia de  $1\ \mu\text{F}$ .



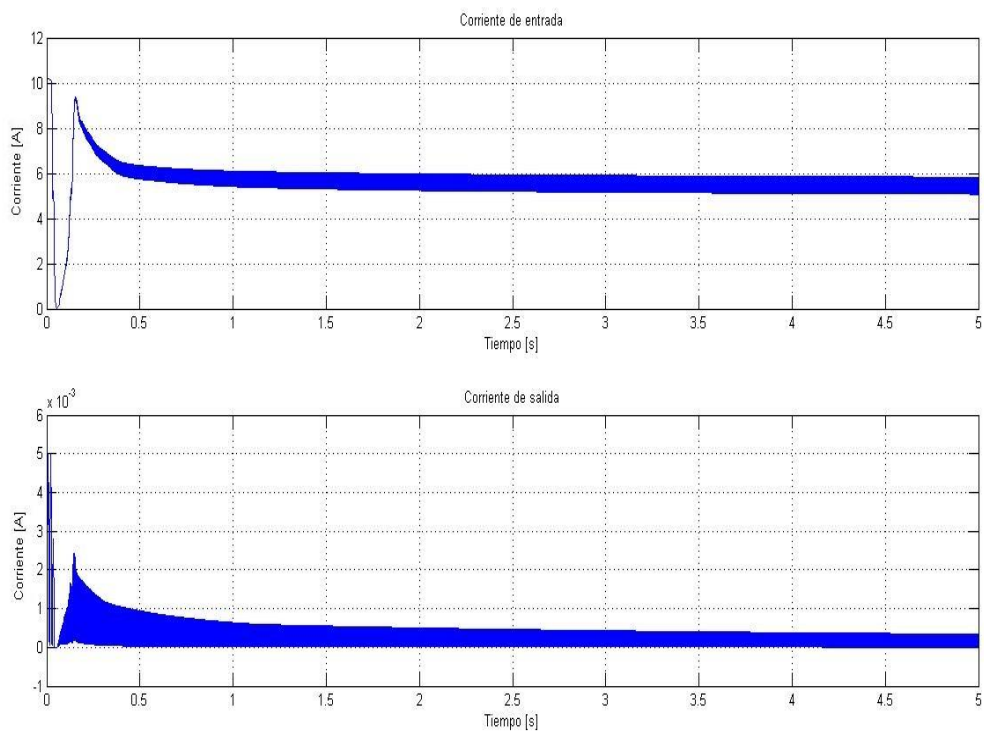
**Figura 29: Voltaje de compuerta de cada interruptor**



**Figura 30: Potencia de entrada y salida**

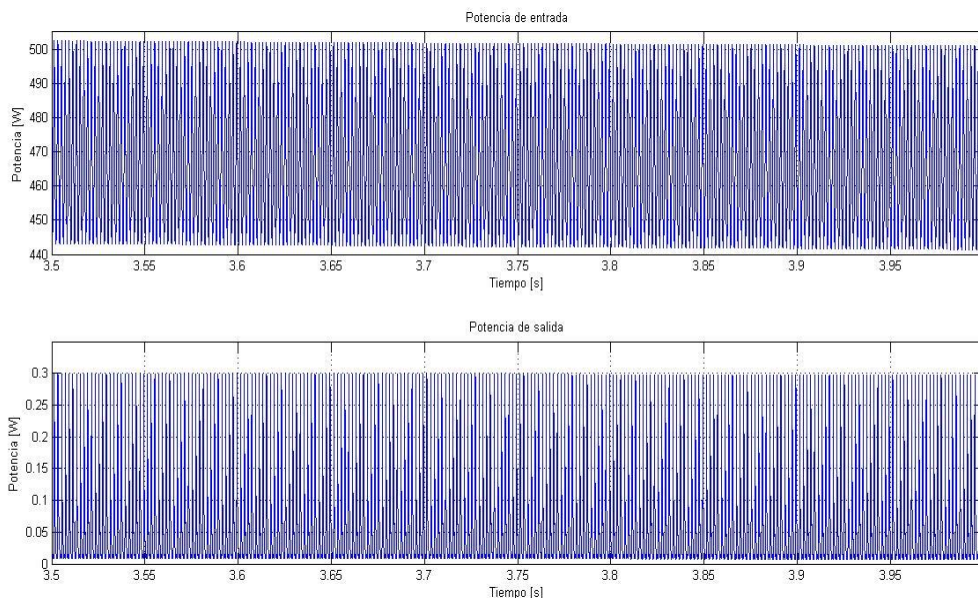


**Figura 31: Voltaje de entrada y salida**



**Figura 32: Corriente de entrada y salida**

Realizando un acercamiento a la figura 30 puede observarse el rizado en la potencia. Observando los puntos máximos y mínimos de cada potencia, se obtiene el punto medio y qué tanto rizado existe. Esto se puede observar en la figura 33.

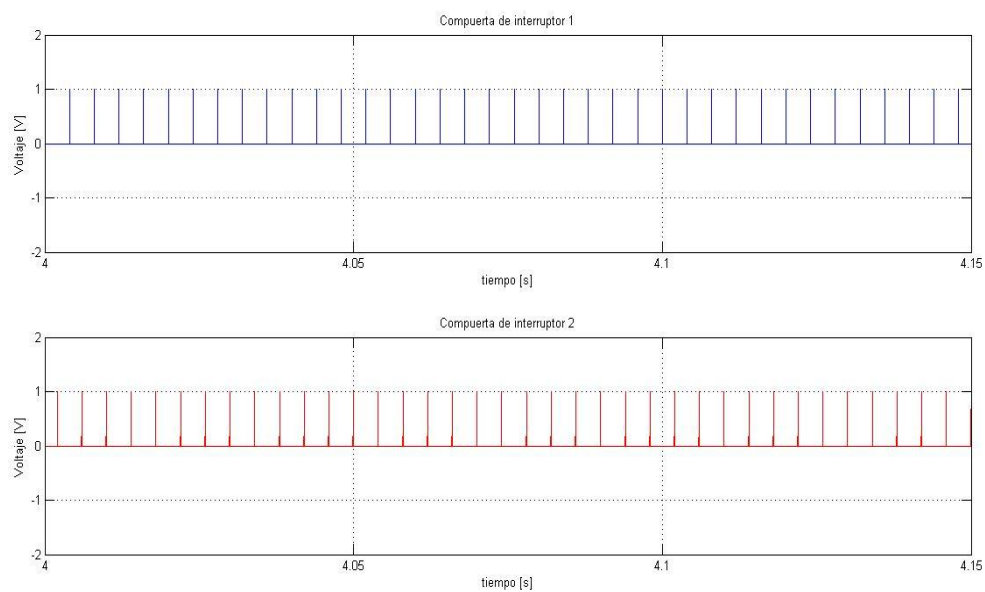


**Figura 33: Rizado de potencia de entrada y salida**

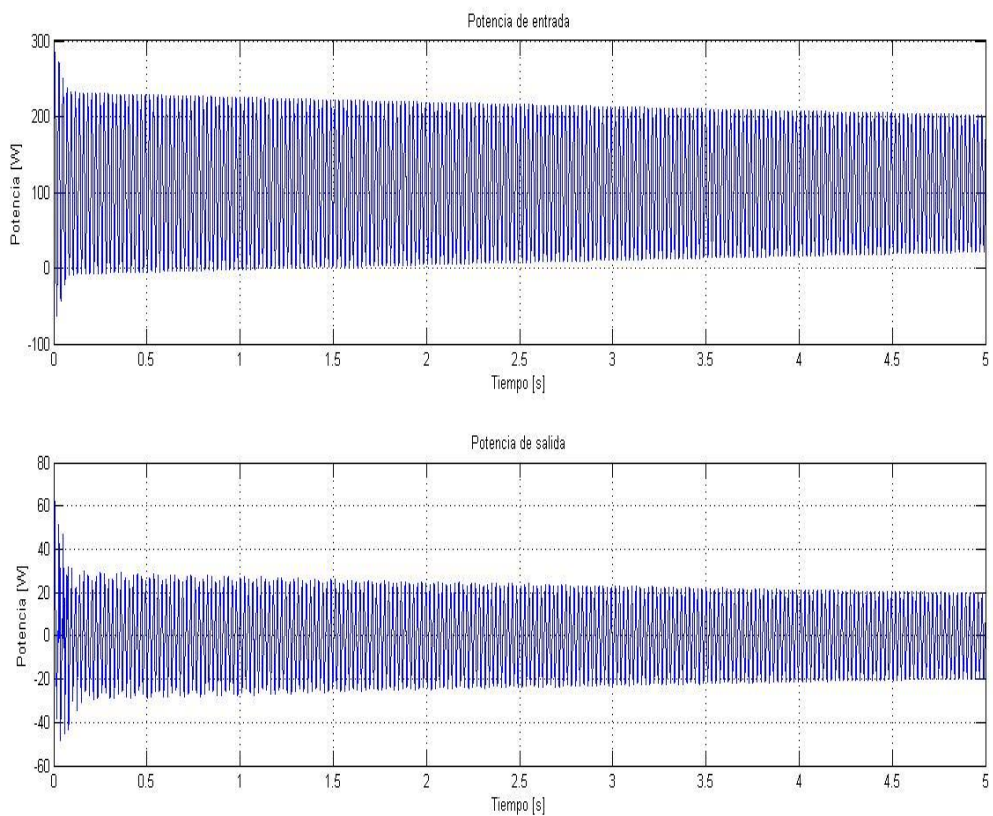
La potencia de entrada oscila alrededor de 472.4 W y la potencia de salida alrededor de 0.1531 W, por lo que la eficiencia es de 0.03%. El rizado pico a pico de la potencia de entrada es de 59 W y de 0.2904 W en la salida.

### **Prueba con carga RL en paralelo**

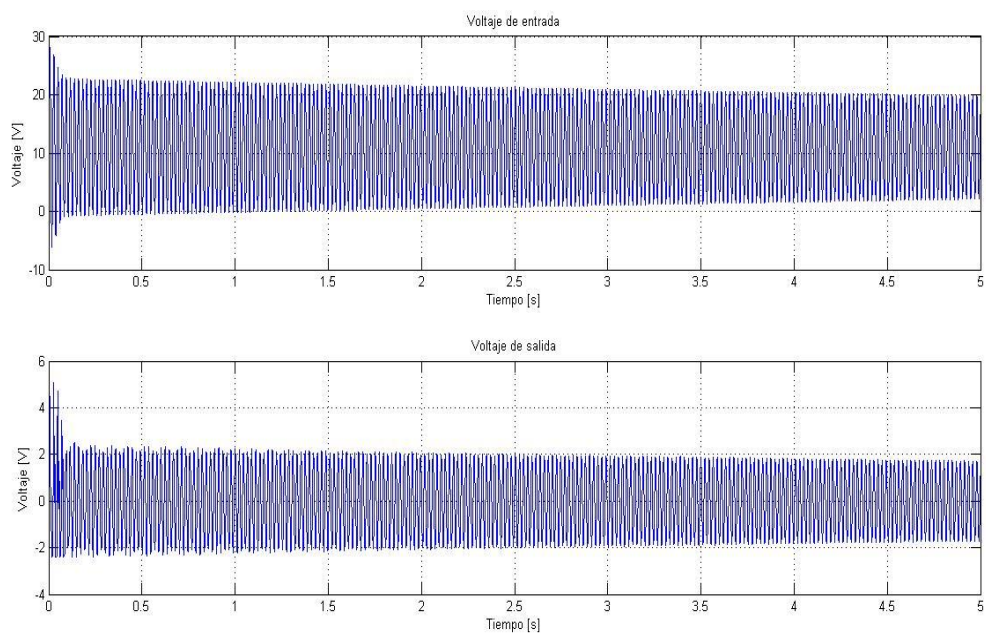
En las figuras 34, 35, 36 y 37 se muestran voltaje de compuerta de cada interruptor, potencia de entrada y salida, voltaje de entrada y salida y corriente de entrada y salida respectivamente. En este caso, se conectó en paralelo a la resistencia de carga de 500  $\Omega$  una inductancia de 1 mH.



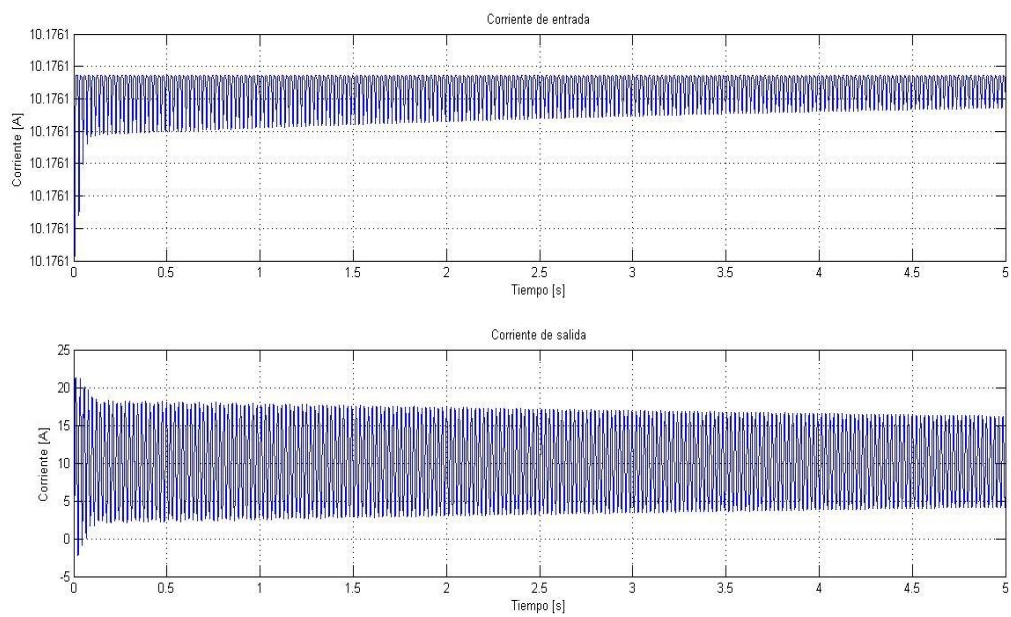
**Figura 34: Voltaje de compuerta de cada interruptor**



**Figura 35: Potencia de entrada y salida**



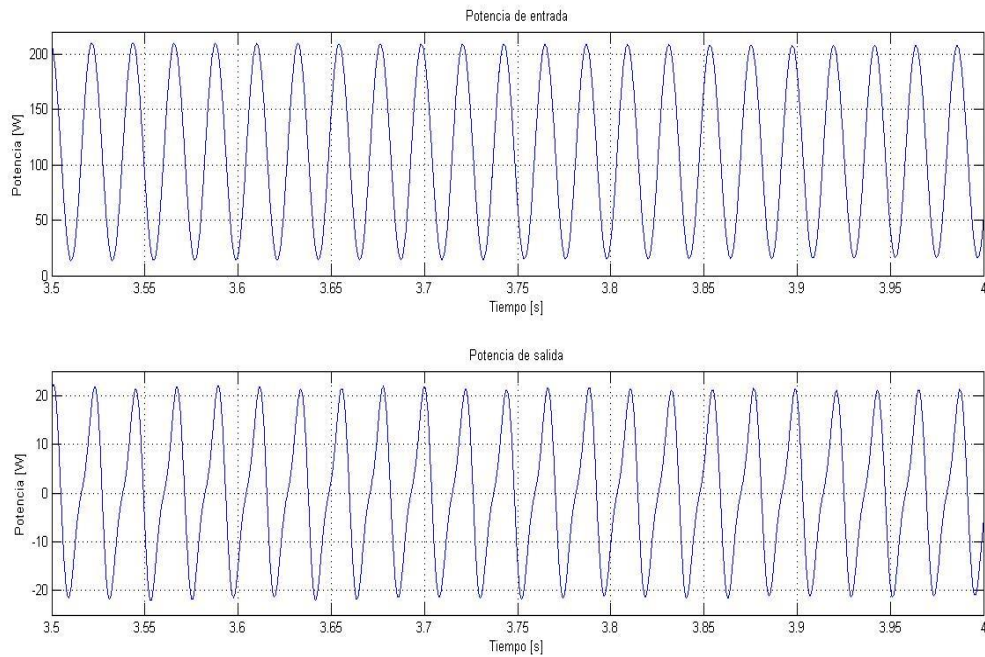
**Figura 36: Voltaje de entrada y salida**



**Figura 37: Corriente de entrada y salida**



Realizando un acercamiento a la figura 35 puede observarse el rizado en la potencia. Observando los puntos máximos y mínimos de cada potencia, se obtiene el punto medio y qué tanto rizado existe. Esto se puede observar en la figura 38.

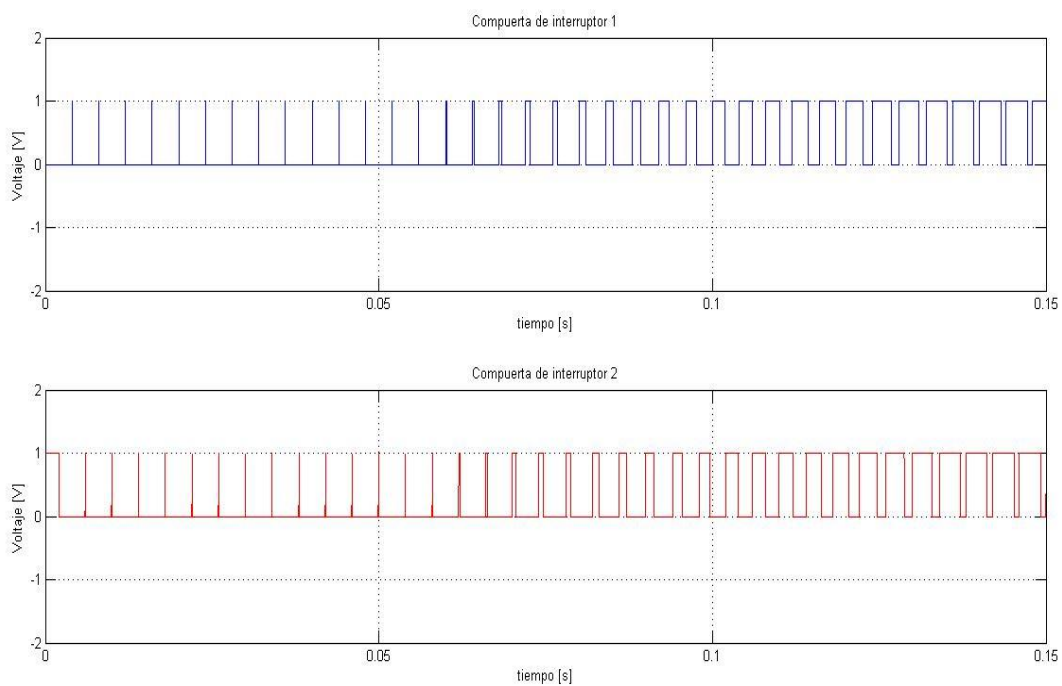


**Figura 38: Rizado de potencia de entrada y salida**

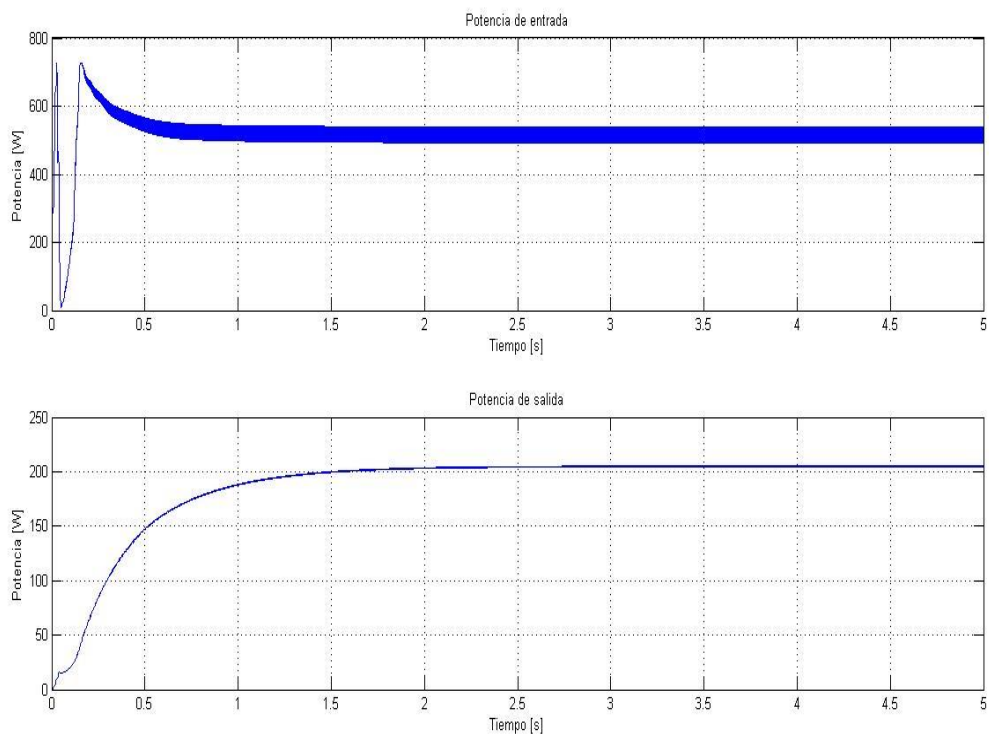
La potencia de entrada oscila alrededor de 11.685W y la potencia de salida alrededor de  $-0.015$  W, por lo que la eficiencia es de 0.13%. El rizado pico a pico de la potencia de entrada es de 194.83 W y de 43.73 W en la salida.

### **Prueba con carga RL en serie**

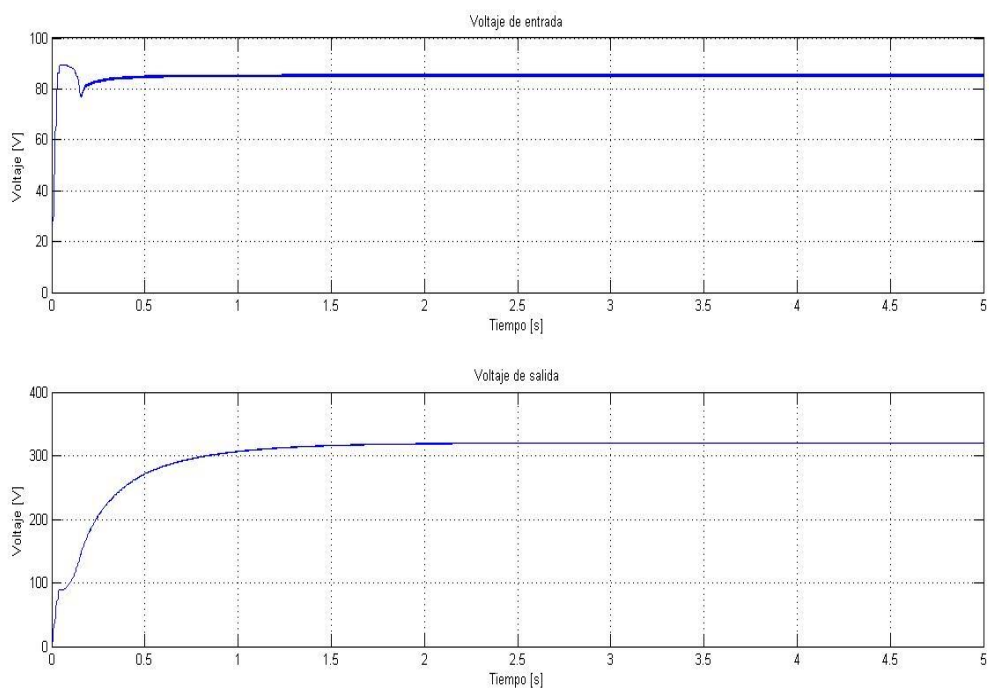
En las figuras 39, 40, 41 y 42 se muestran voltaje de compuerta de cada interruptor, potencia de entrada y salida, voltaje de entrada y salida y corriente de entrada y salida respectivamente. En este caso, se conectó en serie a la resistencia de carga de  $500 \Omega$  una inductancia de 1 mH.



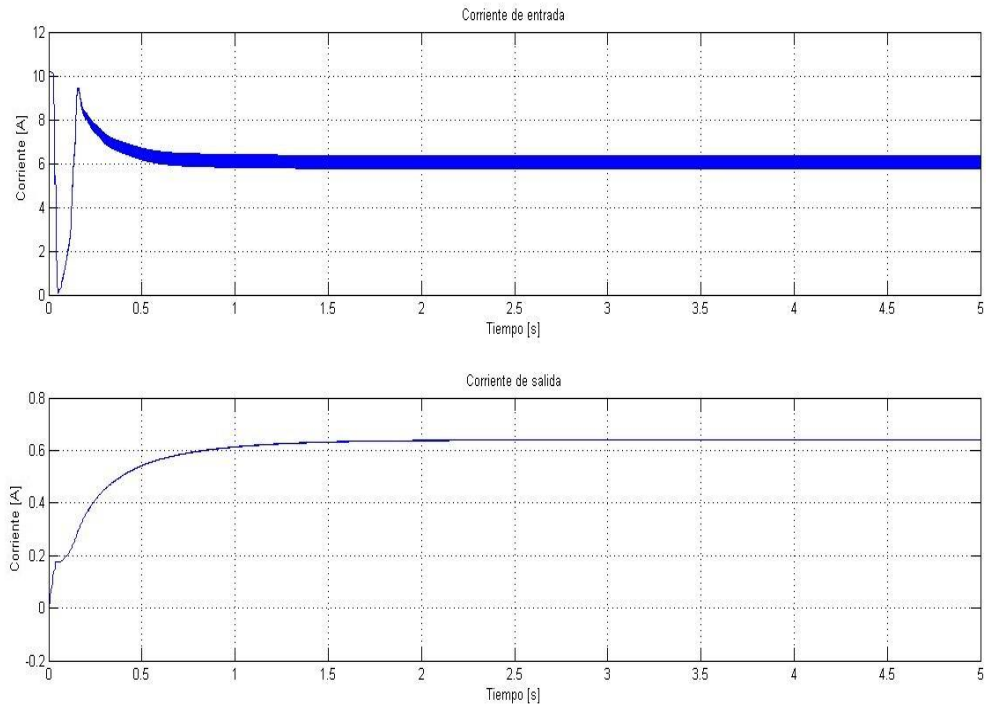
**Figura 39: Voltaje de compuerta de cada interruptor**



**Figura 40: Potencia de entrada y salida**



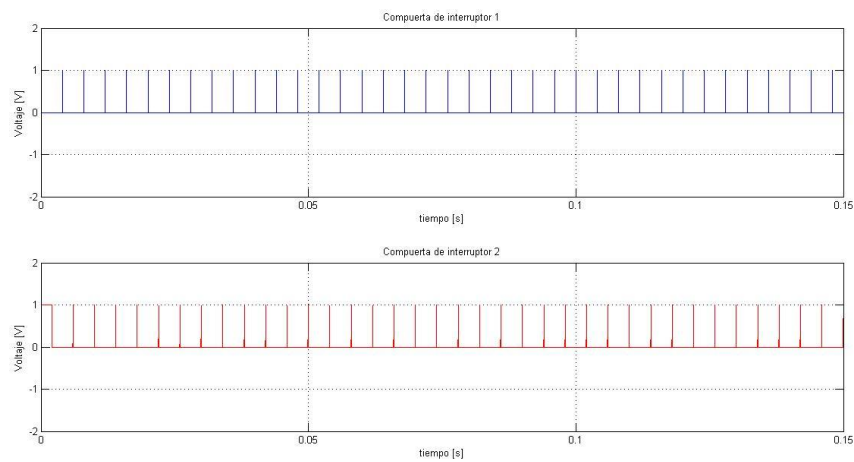
**Figura 41: Voltaje de entrada y salida**



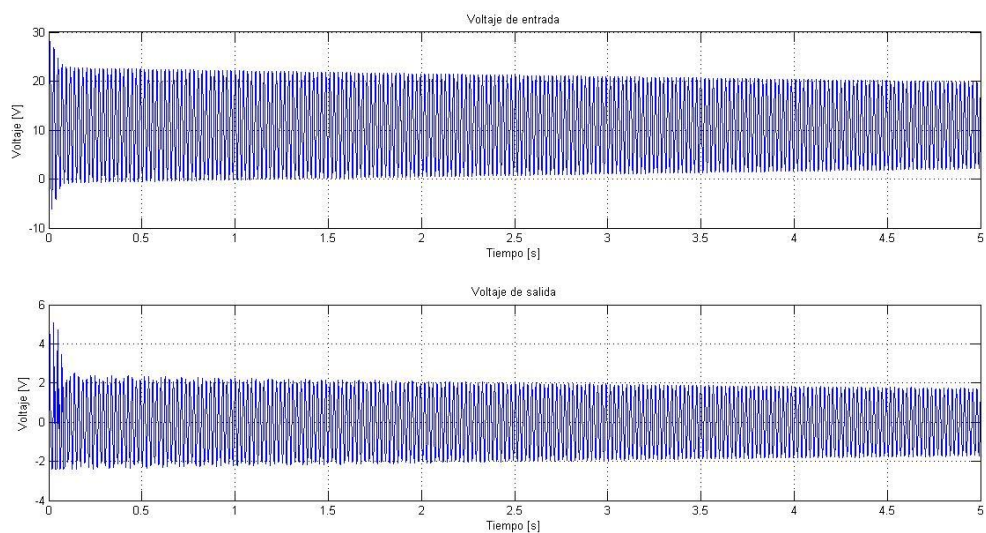
**Figura 42: Corriente de entrada y salida**

## Prueba con carga RLC en paralelo

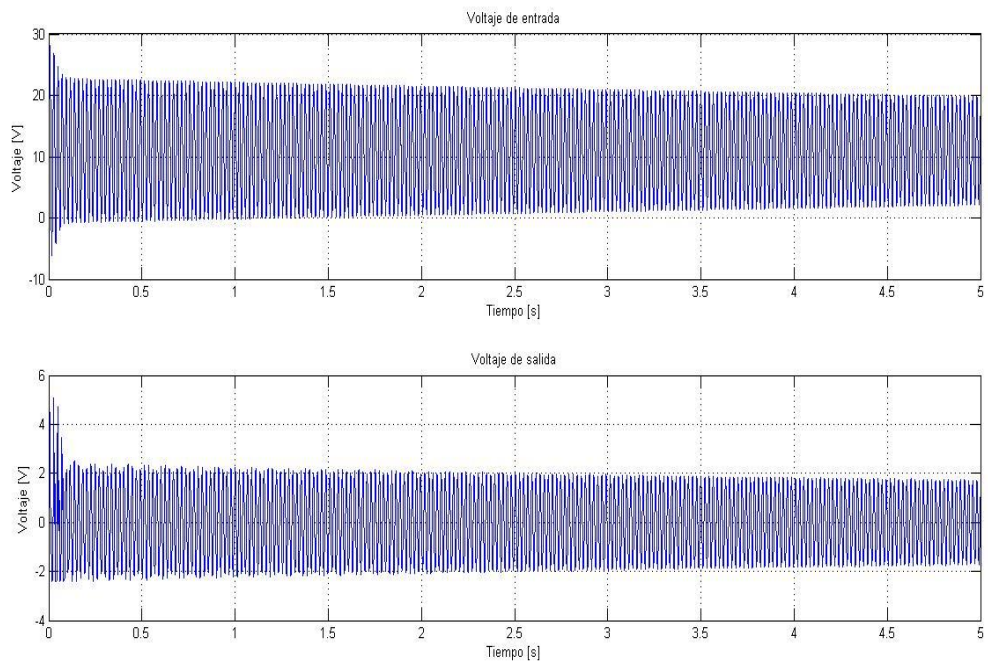
En las figuras 43, 44, 45 y 46 se muestran voltaje de compuerta de cada interruptor, potencia de entrada y salida, voltaje de entrada y salida y corriente de entrada y salida respectivamente. En este caso, se conectó en paralelo a la resistencia de carga de  $500\ \Omega$  una capacitancia de  $1\ \mu\text{F}$  y una inductancia de  $1\text{mH}$ .



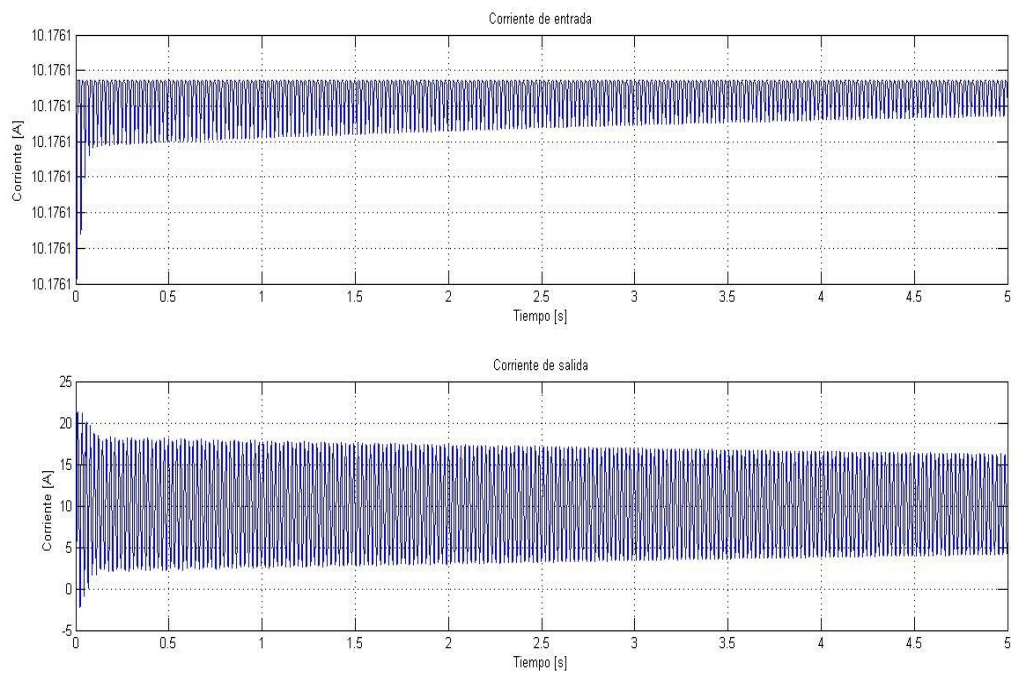
**Figura 43: Voltaje de compuerta de cada interruptor**



**Figura 44: Potencia de entrada y salida**

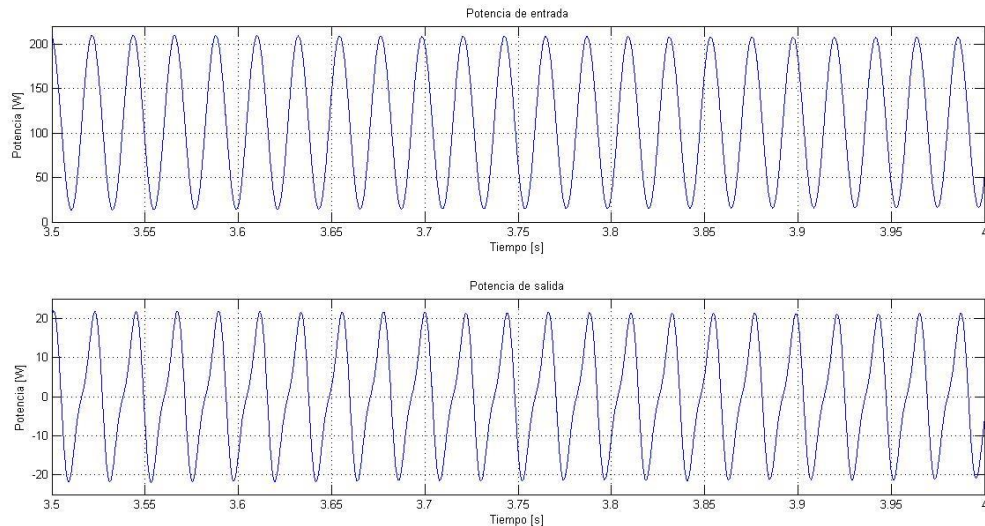


**Figura 45: Voltaje de entrada y salida**



**Figura 46: Corriente de entrada y salida**

Realizando un acercamiento a la figura 44 puede observarse el rizado en la potencia. Observando los puntos máximos y mínimos de cada potencia, se obtiene el punto medio y qué tanto rizado existe. Esto se puede observar en la figura 47.

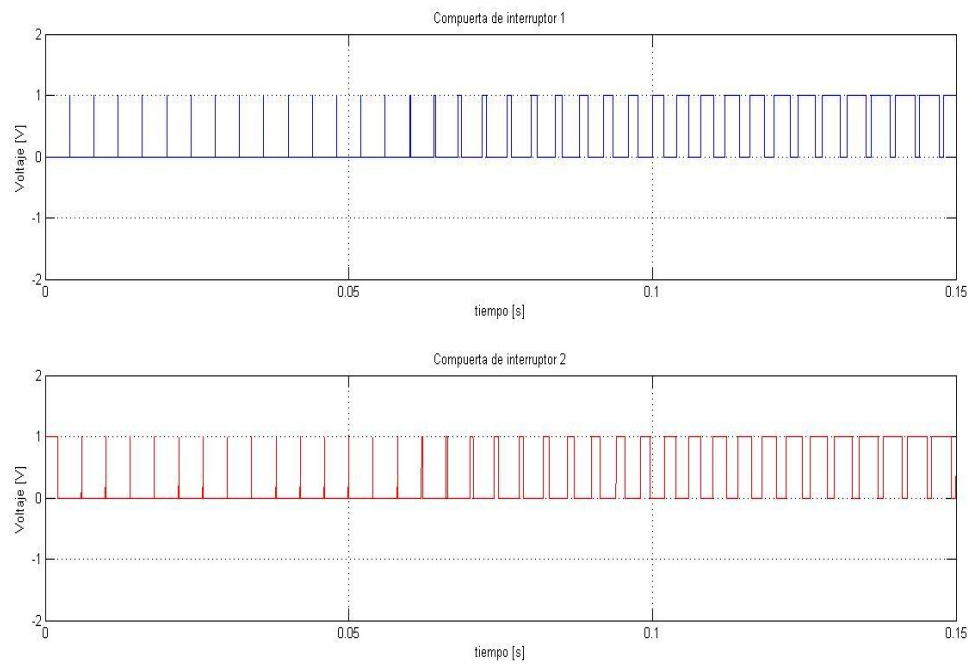


**Figura 47: Rizado de potencia de entrada y salida**

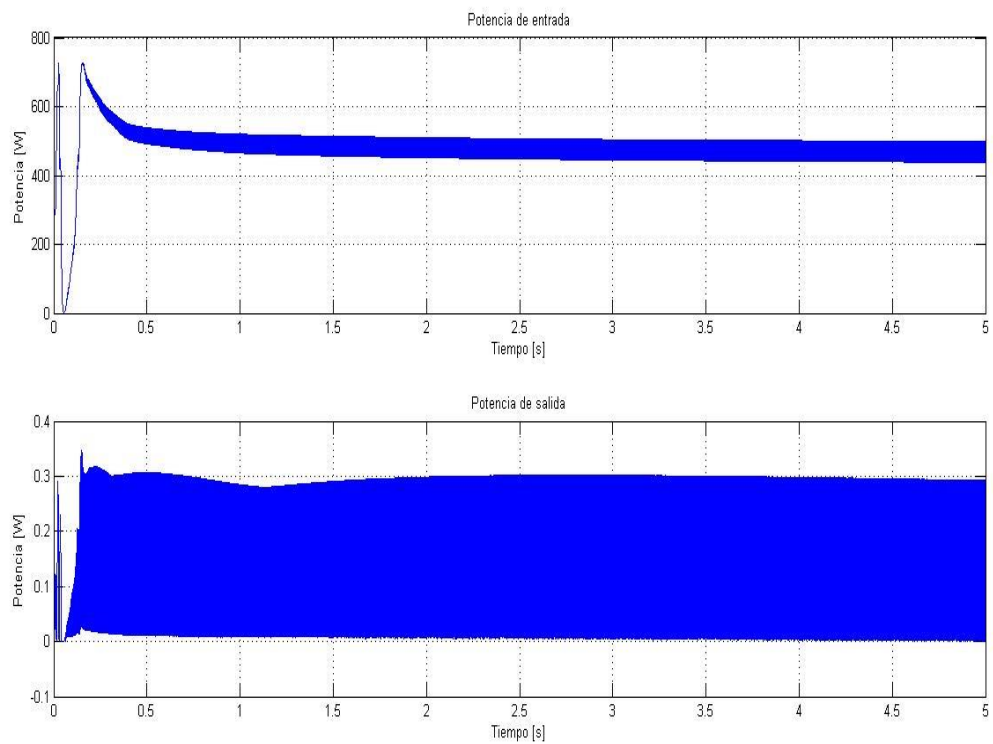
La potencia de entrada oscila alrededor de 111.715 W y la potencia de salida alrededor de -0.045 W, por lo que la eficiencia es de 0.04%. El rizado pico a pico de la potencia de entrada es de 192.77 W y de -0.045 W en la salida.

### **Prueba con carga RLC en serie**

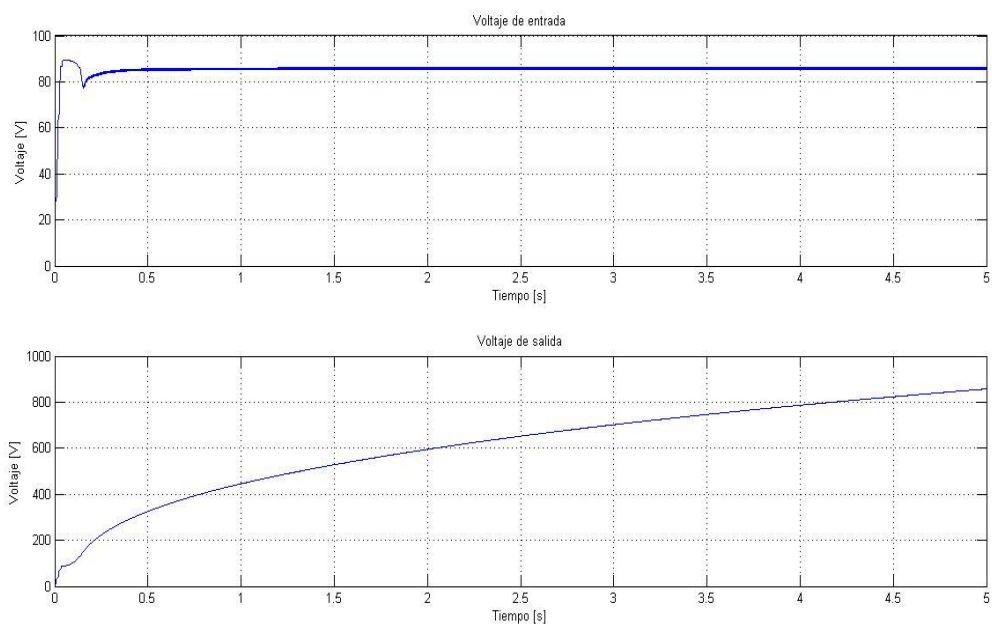
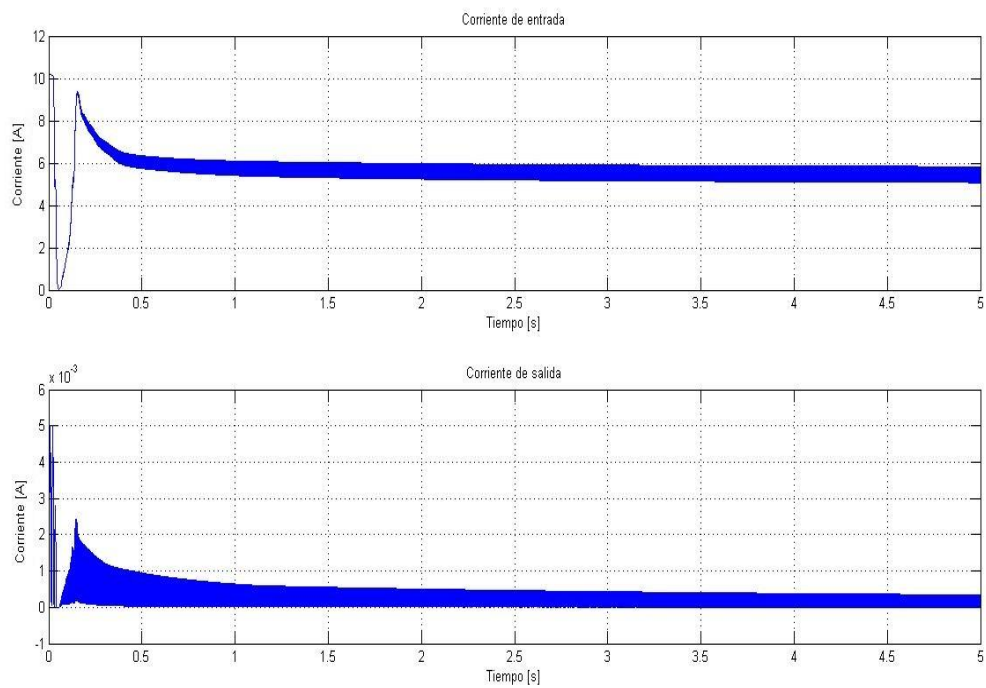
En las figuras 48, 49, 50 y 51 se muestran voltaje de compuerta de cada interruptor, potencia de entrada y salida, voltaje de entrada y salida y corriente de entrada y salida respectivamente. En este caso, se conectó en serie a la resistencia de carga de 500  $\Omega$  una capacitancia de 1  $\mu\text{F}$  y una inductancia de 1mH.



**Figura 48: Voltaje de compuerta de cada interruptor**

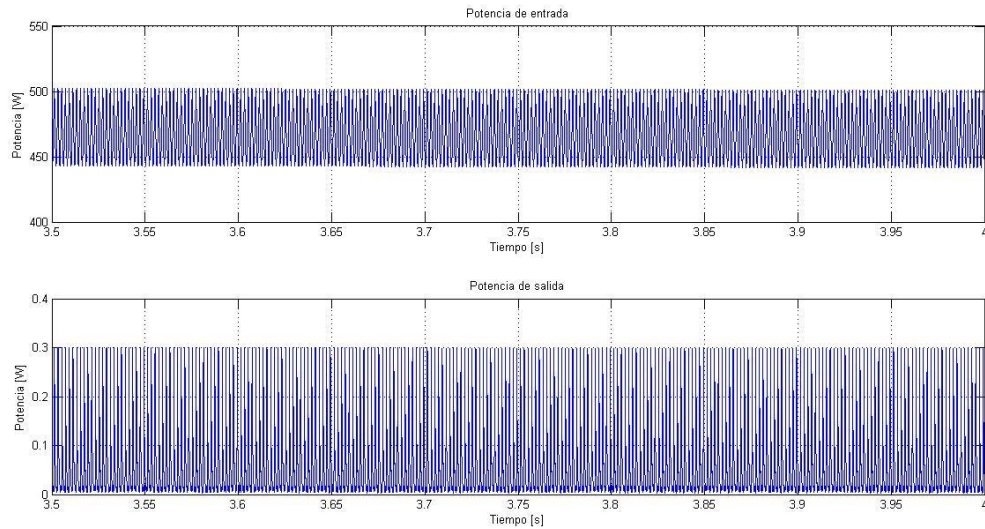


**Figura 49: Potencia de entrada y salida**

**Figura 50: Voltaje de entrada y salida****Figura 51: Corriente de entrada y salida**



Realizando un acercamiento a la figura 49 puede observarse el rizado en la potencia. Observando los puntos máximos y mínimos de cada potencia, se obtiene el punto medio y qué tanto rizado existe. Esto se puede observar en la figura 52.

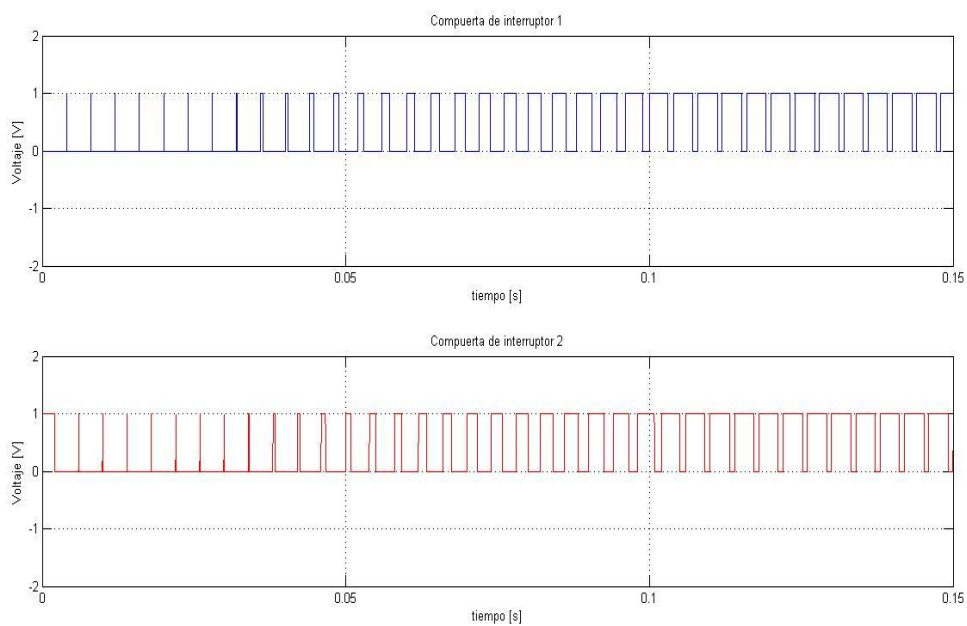


**Figura 52: Rizado de potencia de entrada y salida**

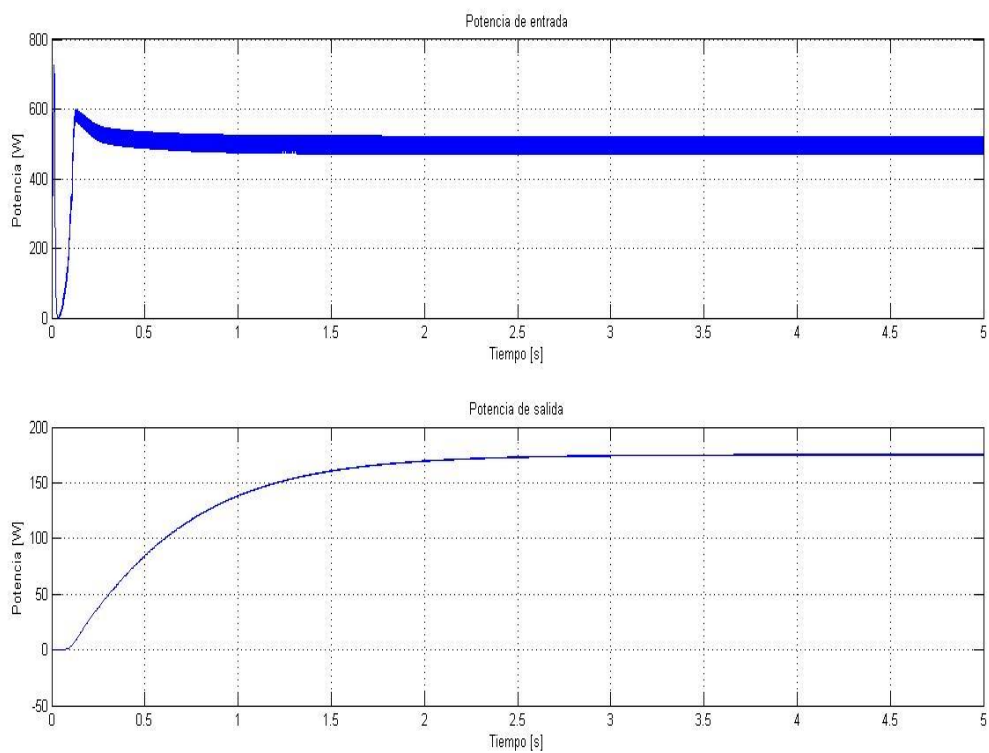
La potencia de entrada oscila alrededor de 472.55 W y la potencia de salida alrededor de -0.15165 W, por lo que la eficiencia es de 0.03%. El rizado pico a pico de la potencia de entrada es de 59.3 W y de 0.2953 W en la salida.

### **Prueba con carga de batería**

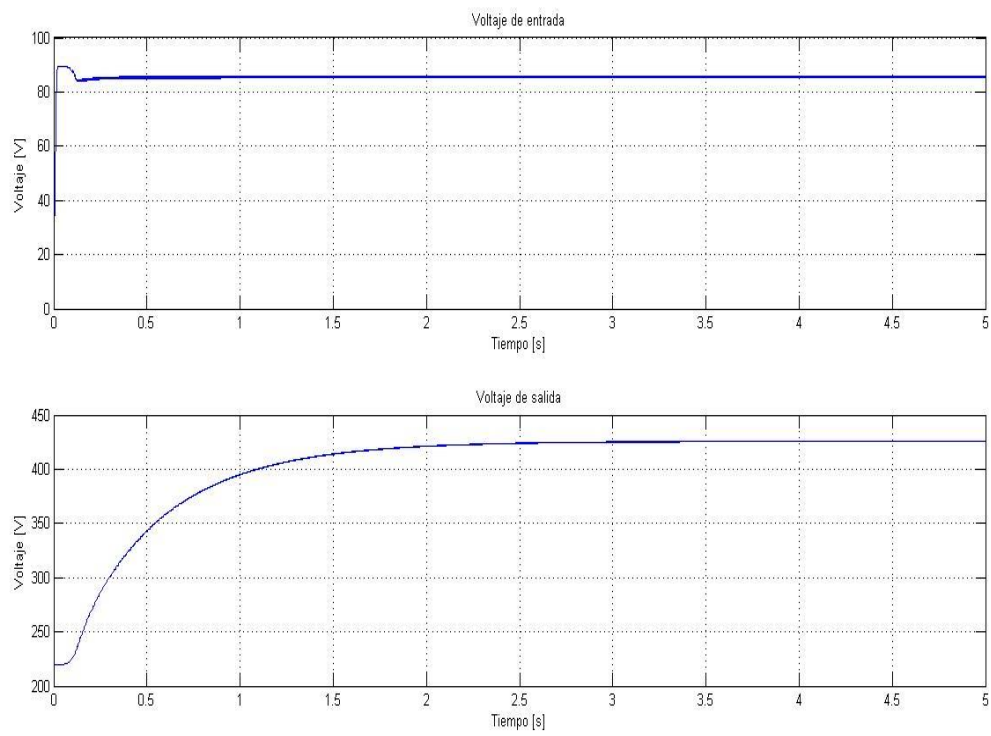
En las figuras 53, 54, 55 y 56 se muestran voltaje de compuerta de cada interruptor, potencia de entrada y salida, voltaje de entrada y salida y corriente de entrada y salida respectivamente. En este caso, se conectó a manera de una batería una fuente de 220 V en serie con una resistencia de 500  $\Omega$  y una inductancia de 1mH.



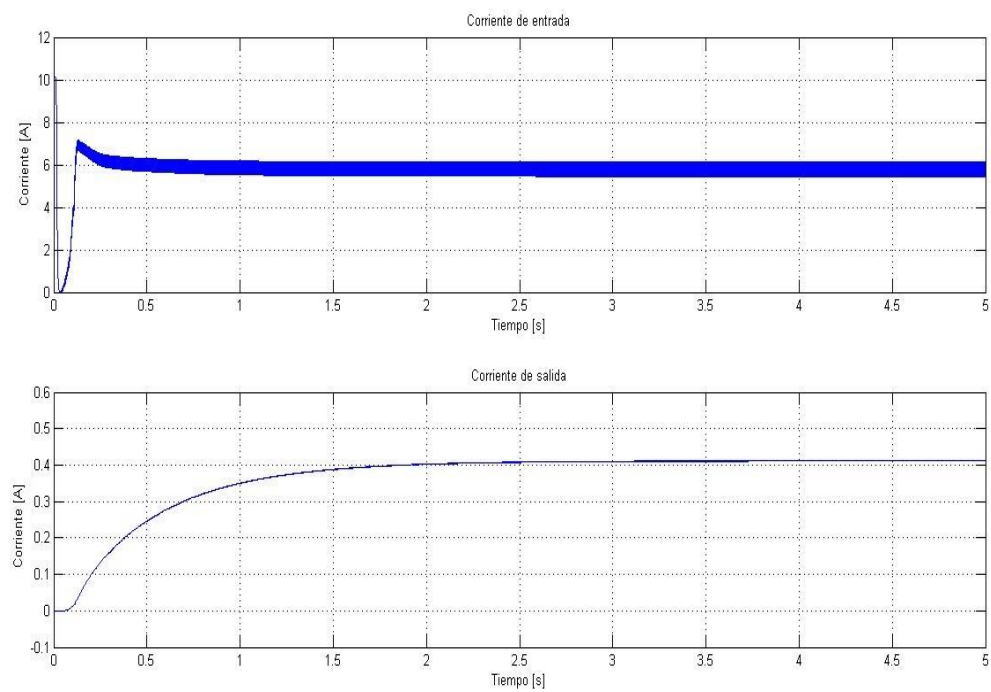
**Figura 53: Voltaje de compuerta de cada interruptor**



**Figura 54: Potencia de entrada y salida**

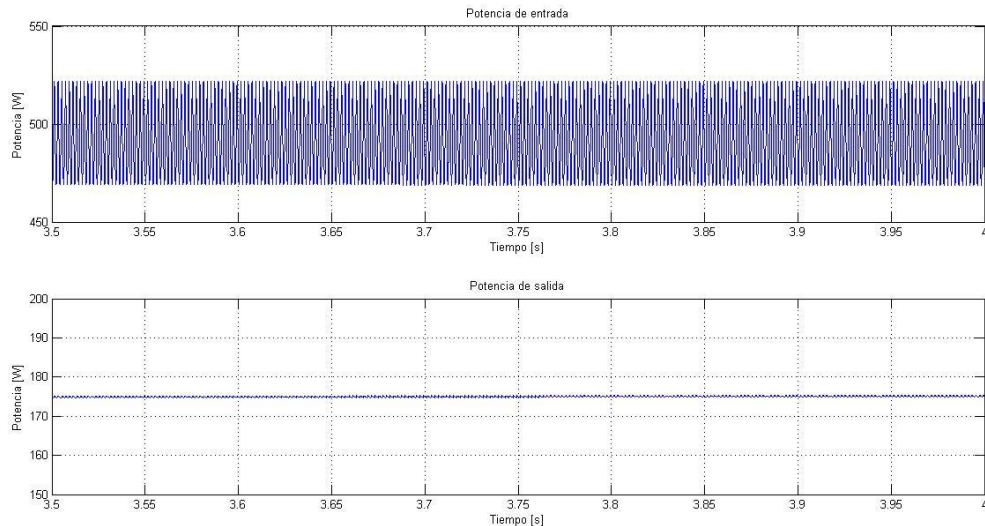


**Figura 55: Voltaje de entrada y salida**



**Figura 56: Corriente de entrada y salida**

Realizando un acercamiento a la figura 54 puede observarse el rizado en la potencia. Observando los puntos máximos y mínimos de cada potencia, se obtiene el punto medio y qué tanto rizado existe. Esto se puede observar en la figura 57.

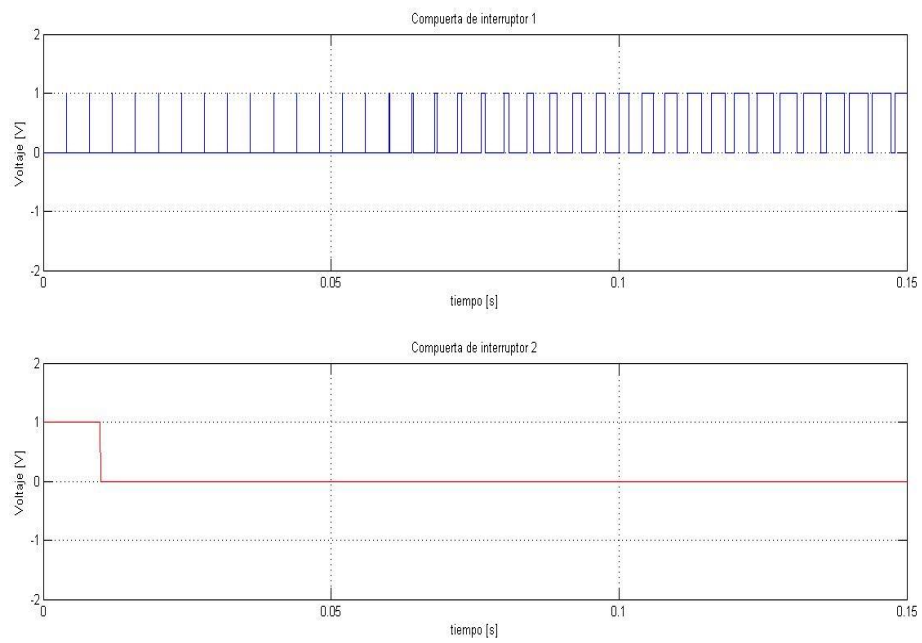


**Figura 57: Rizado de potencia de entrada y salida**

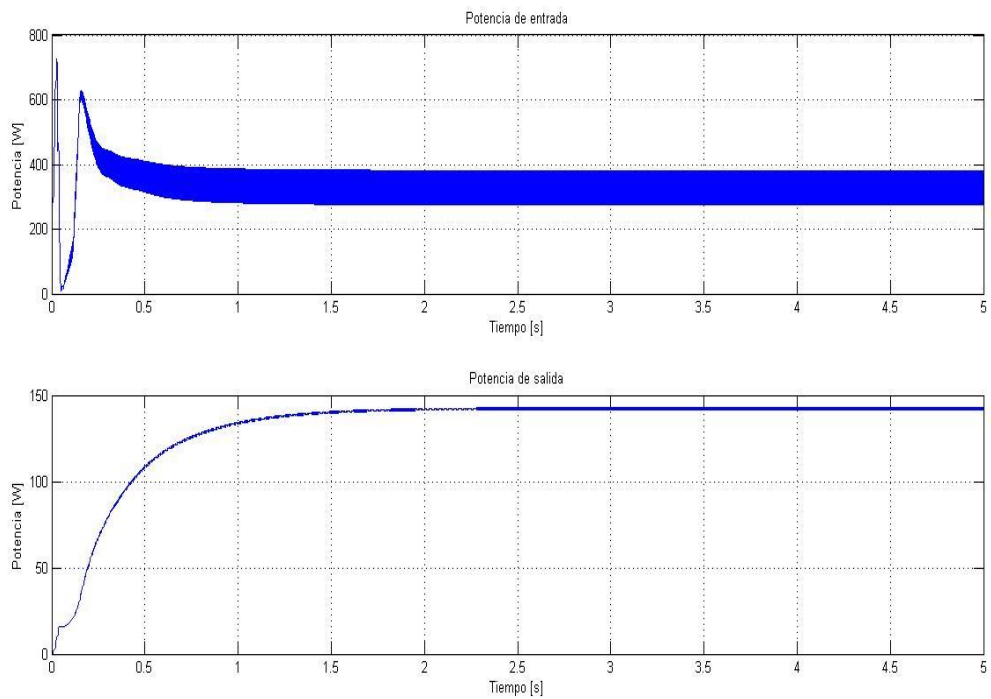
La potencia de entrada oscila alrededor de 499.8 W y la potencia de salida alrededor de -174.95 W, por lo que la eficiencia es de 35%. El rizado pico a pico de la potencia de entrada es de 25.8 W y de 0.5 W en la salida.

### **Prueba con interruptor abierto**

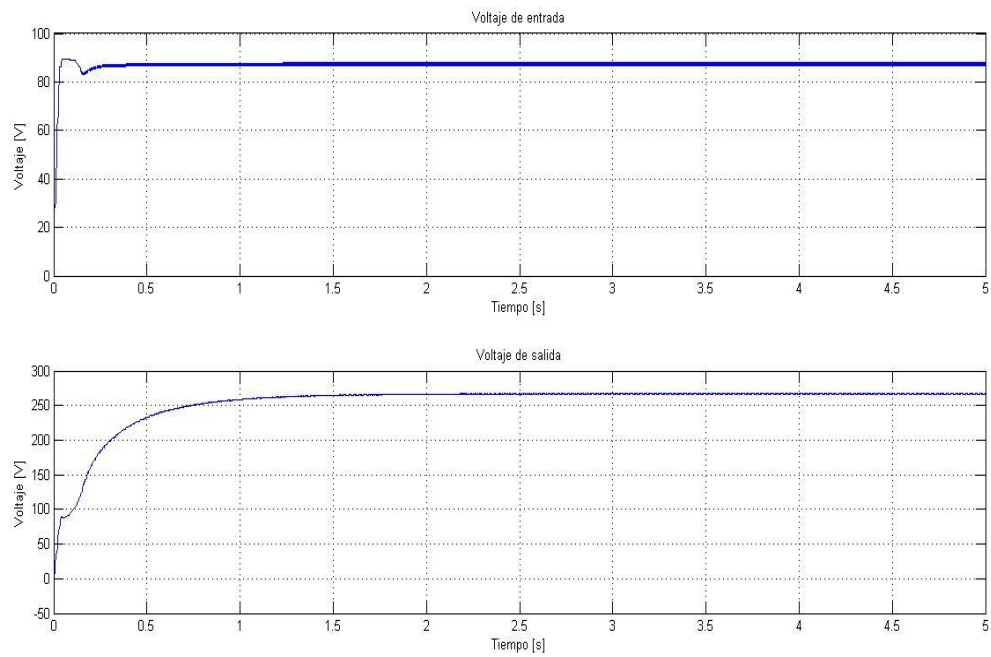
En las figuras 58, 59, 60 y 61 se muestran voltaje de compuerta de cada interruptor, potencia de entrada y salida, voltaje de entrada y salida y corriente de entrada y salida respectivamente. En este caso, se mantuvo abierto uno de los interruptores todo el tiempo.



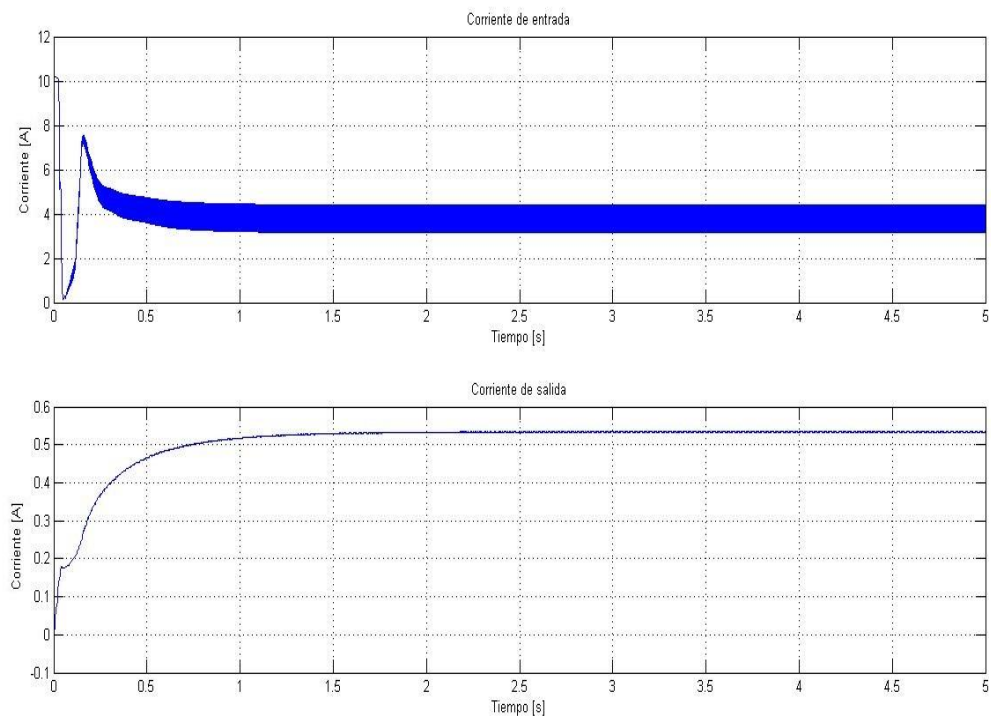
**Figura 58: Voltaje de compuerta de cada interruptor**



**Figura 59: Potencia de entrada y salida**



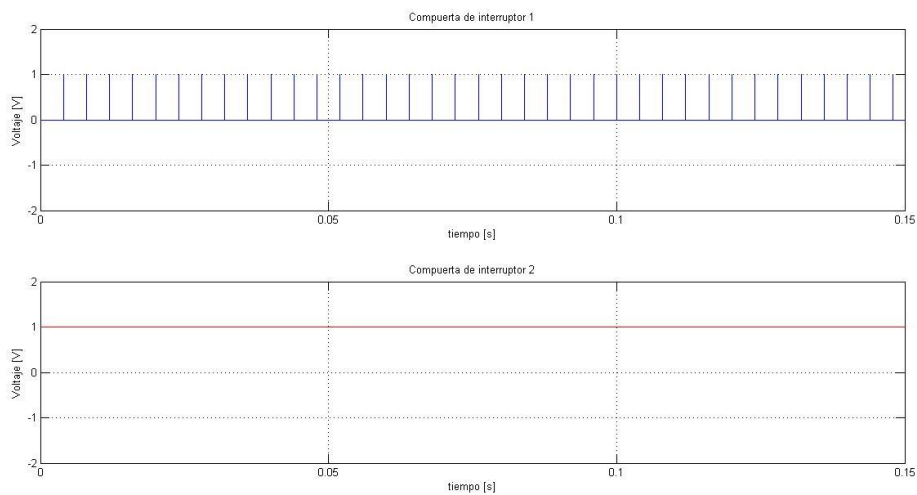
**Figura 60: Voltaje de entrada y salida**



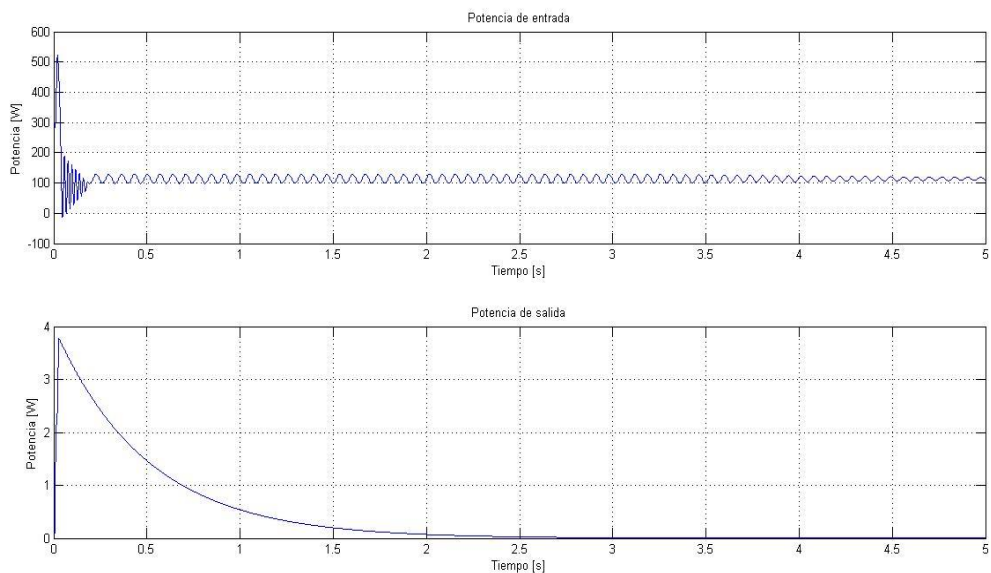
**Figura 61: Corriente de entrada y salida**

## Prueba con interruptor cerrado

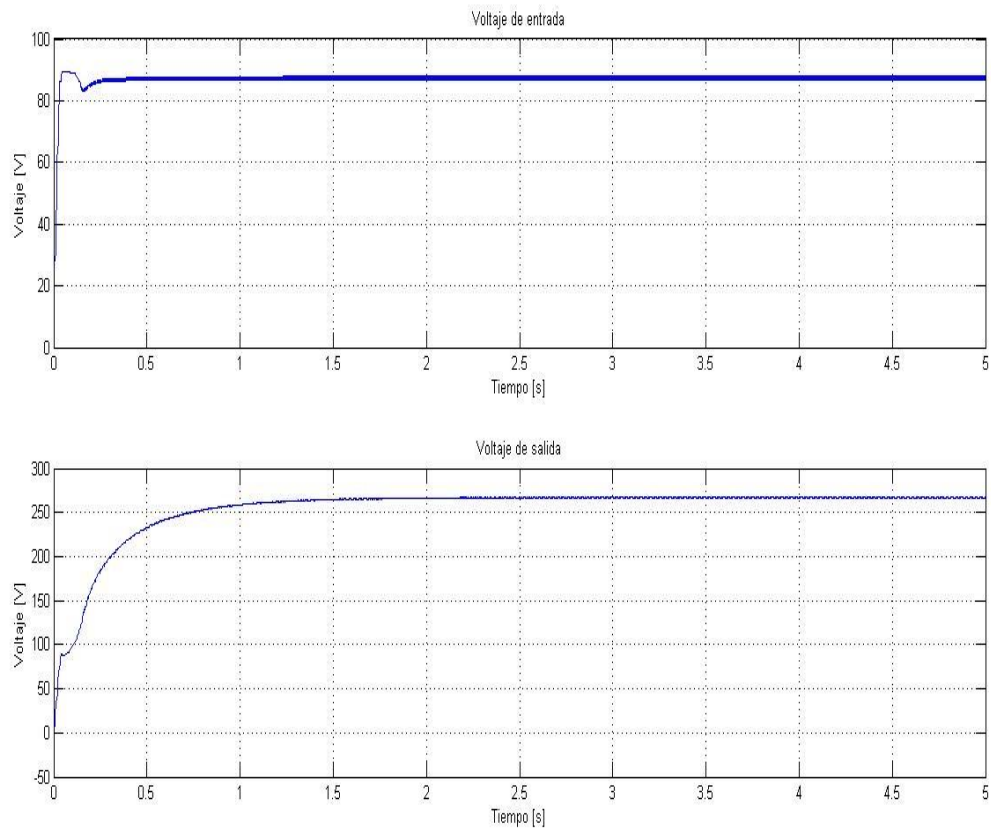
En las figuras 62, 63, 64 y 65 se muestran voltaje de compuerta de cada interruptor, potencia de entrada y salida, voltaje de entrada y salida y corriente de entrada y salida respectivamente. En este caso, se mantuvo cerrado uno de los interruptores todo el tiempo.



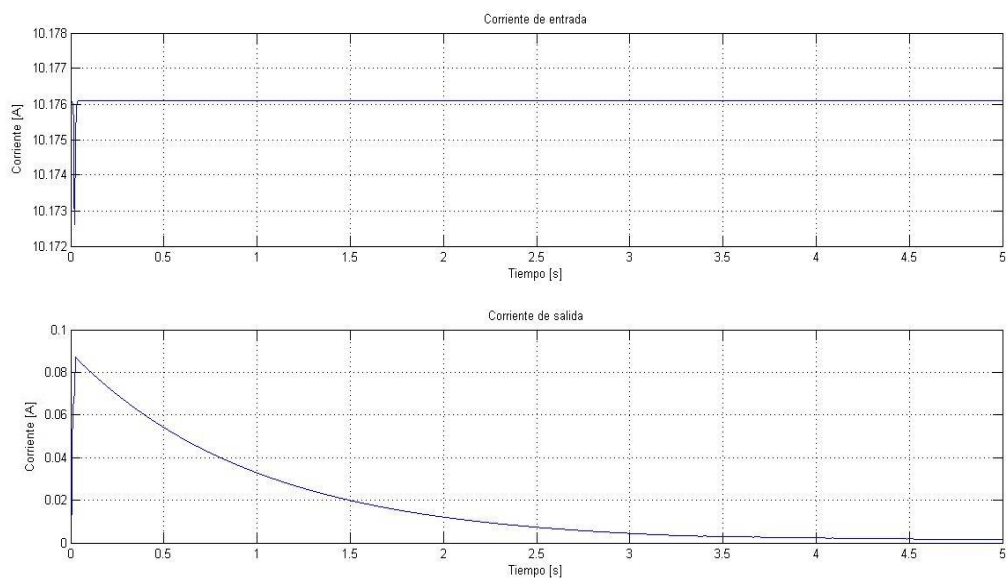
**Figura 62: Voltaje de compuerta de cada interruptor**



**Figura 63: Potencia de entrada y salida**



**Figura 64: Voltaje de entrada y salida**



**Figura 65: Corriente de entrada y salida**



## CAPÍTULO 5: ANÁLISIS DE RESULTADOS

Luego de realizar la simulación, uno de los resultados que más saltan a la vista es la poca eficiencia que tiene el conversor aun utilizando las técnicas ZVS y ZCS, que suponen menores pérdidas en un sistema de conmutación como este. Una de las complicaciones que se encuentran con este método es que la resonancia para lograr que ZVS y ZCS funcionen depende de la frecuencia de conmutación de los interruptores del IBC. Dado que para realizar la simulación se utilizaron bloques distintos y se conectaron entre sí, asumiendo un sistema completamente modular, no se tomó en consideración que la frecuencia de conmutación sería un factor tan determinante en cuanto a la eficiencia del sistema.

Es fácil observar en los resultados que el sistema funciona de una mejor manera al tener como carga una carga netamente resistiva. Los componentes reactivos como las capacitancias y las inductancias pueden producir problemas en el sistema. Dado que este es un sistema con una salida DC, el tener una capacitancia en paralelo con la resistencia no lleva a ningún problema, ya que la capacitancia pasa a comportarse como un circuito abierto y no afecta al comportamiento del sistema. Sucede lo mismo cuando se tiene una inductancia en serie con la resistencia, ya que la inductancia se comporta como un cortocircuito que conduce directamente a la carga resistiva.

Los problemas se presentan cuando existen componentes capacitivos en serie con la resistencia o componentes inductivos en paralelo con la carga resistiva. Como se mencionó previamente, una capacitancia en DC se comporta como un circuito abierto y una inductancia como un cortocircuito. Es por esto que los resultados son similares a las simulaciones donde se realizan un cortocircuito y un circuito abierto, ya que al tener una capacitancia en serie con la resistencia, el circuito nunca se cierra y el voltaje empieza a

subir mientras la corriente se acerca al cero. Por otro lado, con una inductancia en paralelo a la carga resistiva, la simulación se parece a la simulación de cortocircuito, ya que el inductor se comporta como un cortocircuito y la corriente toma el camino de menor impedancia, casi excluyendo a la carga resistiva.

El sistema no presenta mayores problemas al momento de tener un circuito abierto. La potencia de entrada se mantiene relativamente estable y la potencia de salida se acerca a cero debido a la corriente inexistente en este momento. Cuando se tiene un cortocircuito, además de desplomarse el voltaje, existen problemas no solamente en la salida del IBC sino también en la entrada. Aunque el controlador MPPT se mantiene regulando el ciclo de trabajo para obtener la mejor potencia de la celda fotovoltaica, al momento del cortocircuito existe una potencia negativa, es decir, que sale del IBC en lugar de entrar, lo que puede provocar problemas e incluso dañar al controlador y/o al sistema entero dependiendo de la magnitud de la potencia y del diseño específico del sistema. El pico de corriente que se produce al momento del cortocircuito presenta inconvenientes debido a su gran magnitud, ya que el pico de corriente llega a una magnitud del orden de  $10^8$ . Un pico de corriente de esta magnitud recorriendo el circuito puede causar graves daños en el sistema.

En el sistema donde se tiene un cortocircuito, o una inductancia en paralelo a la carga, se observa que la salida pierde su comportamiento DC y el rizado se produce de tal manera que el resultado puede tomarse como una onda AC. Como todo el sistema está diseñado para trabajar en DC, los componentes pueden dañarse.

Ocurre lo mismo con el sistema conectado a una carga RLC. Con una carga RLC en serie, la capacitancia actúa como un circuito abierto, por lo que la corriente se acerca al

cero y el voltaje aumenta. Nuevamente el problema mayor se presenta al tener una carga con una inductancia en paralelo, ya que el sistema tiene una salida AC.

El problema del cortocircuito trata de ser solucionado por el controlador MPPT cambia su comportamiento en gran medida cuando se tiene un cortocircuito en la carga. Se puede observar que el controlador baja el ciclo de trabajo hasta reducirlo a pulso pequeños cercanos a apagar el sistema.

Aparte de la carga resistiva, la carga que produjo buenos resultados fue la simulación de batería. El rizado de salida es pequeño y el sistema se estabiliza en poco tiempo, aunque se mantiene el problema de la baja eficiencia.

Debe destacarse que, a pesar del problema que existe con la baja eficiencia, el IBC simulado reduce el rizado de salida de una manera excelente. Se puede apreciar que, en las simulaciones con la carga resistiva, reduce el rizado de entrada en una relación cercana a 40 a 1.

Al tener una falla en el sistema de manera que un interruptor se mantenga en estado de apagado todo el tiempo, el sistema es capaz de seguir funcionando a una potencia menor. Tanto la potencia de entrada como la de salida se reducen.

Si un interruptor se mantiene todo el tiempo en estado de encendido, se produce un cortocircuito interno de manera que tanto la salida de voltaje como de corriente se acercan a cero. La corriente de entrada se mantiene constante mientras el voltaje de entrada se convierte en una onda AC con pequeña amplitud, lo que hace que la potencia también parezca ser una onda AC. La potencia no llega a volverse negativa, por lo que no existe potencia que regrese al controlador ni a la celda fotovoltaica.

## CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES

Luego de realizar este estudio, se puede concluir que para optimizar el IBC debe tomarse en cuenta todo el sistema de generación y no solamente un bloque, como es el convertidor. En casos como el presente, donde el controlador puede disminuir el ciclo de trabajo de los interruptores pero no los elimina, es una buena idea conectar un fusible o un breaker antes de conectar a la carga por si algún problema llega a presentarse. De otra manera, puede trabajarse sobre el controlador de manera que pueda eliminar el trabajo de conmutación en caso de presentarse un problema.

En un sistema como éste, donde la eficiencia es baja, debe tenerse especial cuidado con el calor. Si bien el sistema puede funcionar, deberían colocarse protecciones como breakers termoeléctricos ya que la energía perdida debe transformarse en calor y puede traer problemas a los componentes. De igual manera, deberían colocarse disipadores de calor, ya que, con la carga resistiva, cuando se presenta el mejor comportamiento, casi el 60% de la potencia proporcionada se pierde.

Podría colocarse un lazo de retroalimentación para controlar la potencia de salida, en caso de que la carga sea muy sensible a cambios. Si se produce un problema de manera que un interruptor esté siempre abierto, el sistema funciona con menor potencia, que puede ser un problema si la carga necesita una mayor potencia.

Una de las mejores formas de optimizar el sistema sería utilizando un controlador que no regule solamente el ciclo de trabajo, si no que pueda cambiar la frecuencia del voltaje de compuerta de los interruptores. De esta manera, el IBC puede quedarse diseñado

de una manera, con componentes fijos, y el controlador ajustar el disparo del voltaje de compuerta de manera que se obtenga una mayor potencia de salida, con menores pérdidas.

## CAPÍTULO 7: RECOMENDACIONES

Concluida esta tesis se considera interesante continuar el análisis, de manera que se propone:

- Extender este análisis a más clases de fallas.
- Realizar un dimensionamiento de componentes de manera que la resonancia sea acorde a la frecuencia de conmutación, o en su defecto diseñar un nuevo sistema de control que proporcione mayor facilidad de regular la frecuencia de conmutación.
- Extender este análisis a IBCs con mayores convertidores boost conectados entre sí.

## REFERENCIAS

- Ayyanar, R., Mohan, N., & Persson, E. (2002). *Soft switching in DC-DC converters, Principles, Practical topologies, Desing Techniques, Latest Developments*. Minneapolis: PEC.
- Crews, R. (2008). *LM5032 Interleaved boost converter*. National Semiconductor.
- Erickson, R., & Maksimovic, D. (2000). *Fundamentals of Power Electronics*. Kluwer Academic Publishers.
- Femia, N., Petrone, G., Spagnuolo, G., & Vitelli, M. (2012). *Power Electronics and Control Techniques for Maximum Energy Harvesting in Photovoltaic Systems*. Milan: CRC Press.
- Juanicó, L. (2010). Análisis comparativo de paneles termoeléctricos y fotovoltaicos para electrificación de hogares aislados. *Interciencia*, 140-143.
- Kavitha, S., Rajan, E., & Vengatesh, P. (2014). Performance analysis of interleaved DC-DC boost converter for photo-voltaic power generation systems. *Green computing communication and electrical engineering*, 1-6.
- program, C. o., & council, N. r. (208). *Grading NASA's solar explotarion program: A midterm review*. National academic press.
- Rekioua, D., & Matagne, E. (2012). *Optimization of Photovoltaic Power Systems*. Springer.
- Rohini, G., Abirami, M., & Ramprakash, R. (2013). Modeling of photovoltaic array and simulation of MPPT algorithm. *Advance materials research*, 23-28.
- Sheperd, W., & Zhang, L. (2014). *Power Converter Circuits*. Boca Raton: CRC Press.
- Teodorescu, R. (2010). *Grid converters for photovoltaic and wind power systems*. Hoboken: John Wiley & Sons.
- van Breussegem, T., & Steyaert, M. (2012). *CMOS integrated Capacitive DC-DC converters*. Springer.