

**ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO**

**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA,  
AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL**

**PROYECTO DE GRADO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERÍA**

**ANÁLISIS DE CONVERTIDORES DE POTENCIA DC-DC CON  
SOFTWARE LIBRE OPENMODELICA**

**AUTOR:**

**STEFANY CAROLINA GARZÓN MUÑOZ**

**SANGOLQUI – ECUADOR**

**2012**

## **CERTIFICACIÓN**

Certificamos que el presente proyecto de grado titulado: “ANÁLISIS DE CONVERTIDORES DE POTENCIA DC-DC CON SOFTWARE LIBRE OPENMODELICA”, ha sido desarrollado en su totalidad por la señorita STEFANY CAROLINA GARZÓN MUÑOZ con CI: 172109638-4, bajo nuestra dirección.

Atentamente,

---

Ing. Paúl Ayala  
DIRECTOR

---

Ing. Alexander Ibarra  
CODIRECTOR

## RESUMEN

El presente proyecto se centra en realizar un análisis a los convertidores de potencia DC-DC. En éste documento se trabaja con distintas topologías de conversores, éstas son: *buck*, *boost*, *buck-boost*, *sepic*, *cuk*.

Para realizar el estudio de éstos conversores, se hace uso de dos simuladores de software libre, OpenModelica y Scilab. Se presenta en el proyecto, generalidades de cada uno de éstos simuladores, el modelamiento matemático de conversores y las simulaciones correspondientes a cada una de las topologías anteriormente mencionadas.

Al final del documento se presenta un estudio completo del convertidor *sepic* incluyendo su modelo matemático y una fórmula para determinar la potencia disipada por dicho conversor.

## AGRADECIMIENTO

*Agradezco a mis padres por el apoyo incondicional que me han brindado a través de mi vida y por ser el motor que me impulsa día a día para mejorar y seguir adelante. Gracias a ustedes por su cariño, esfuerzo y dedicación he llegado a cumplir con una meta más en mi vida.*

*A mis hermanos, gracias por estar siempre presentes apoyándome y siendo un soporte enorme en mi vida.*

*A mis amigos por estar presentes apoyándome y compartiendo conmigo, han sido ustedes piezas claves para lograr este objetivo*

*A mis profesores que a lo largo de la vida me han servido de guía y me han inculcado las enseñanzas necesarias para avanzar y lograr en este momento una meta mas en mi vida profesional.*

## DEDICATORIA

*Dedico este proyecto a mi familia, quien siempre confió en mí  
y sin cuyo apoyo nada de esto sería posible.*

## PRÓLOGO

La necesidad de distintas formas de energía eléctrica así como las diferentes aplicaciones para las que son destinadas impulsan el desarrollo del campo de la conversión de energía. Éste desarrollo ayuda no solamente a mejorar el desempeño y rendimiento de maquinaria sino que además mejoran la calidad de la energía utilizada, es por esto que se ha visto la importancia de buscar mejores y más óptimos dispositivos electrónicos que permitan realizar estas conversiones, permitiendo un buen desempeño de equipos.

Con la finalidad de desarrollar un convertidor con mejores prestaciones a los existentes es fundamental en primer lugar un estudio detallado de las topologías presentes hasta la actualidad. Debido a esta razón, el presente documento es sumamente importante puesto que presenta un análisis de las topologías mas importantes de los conversores dc-dc, como son la topología buck, boost, buck-boost, sepic y cuk.

Además de realizar un estudio de los conversores mencionados, éste documento presenta dos simuladores de software libre que pueden ser utilizados como herramientas poderosas para el estudio de sistemas no solamente electrónicos, sino mecánicos, hidráulicos, etc.

## INDICE DE CONTENIDOS

PRÓLOGO .....	vi
INDICE DE CONTENIDOS .....	vii
INDICE DE FIGURAS .....	ix
INDICE DE TABLAS .....	xii
GLOSARIO .....	xiii
CAPITULO I .....	1
INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 ANTECEDENTES .....	1
1.2 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA .....	5
1.3 OBJETIVOS DEL PROYECTO .....	6
1.3.1 Objetivo Principal .....	6
1.3.2 Objetivos Específicos .....	6
CAPITULO II .....	7
MARCO TEÓRICO .....	7
2.1 CONVERTIDORES DE POTENCIA .....	7
2.2 CONVERTIDORES DE POTENCIA DC-DC .....	9
2.3 TIPOS DE CONVERTIDORES DC-DC .....	12
2.3.1 Convertidores <i>Buck</i> .....	12
2.3.2 Convertidores <i>Boost</i> .....	19
2.3.3 Convertidores <i>Sepic</i> .....	25
2.3.4 Convertidores <i>Cuk</i> .....	28
2.3.5 Convertidor Buck-Boost .....	32
2.4 MODELADO MATEMÁTICO DE LOS CONVERTIDORES DC/DC .....	36
2.4.1. Convertidor tipo Buck .....	36
2.4.2. Convertidor tipo Boost .....	37
2.4.3. Convertidor tipo Sepic .....	38
2.4.4. Convertidor tipo Cuk .....	41
2.4.5. Convertidor tipo Buck-Boost .....	43
2.5 GENERALIDADES DEL SIMULADOR OPENMODELICA .....	44
2.6 GENERALIDADES DE SCILAB .....	50

---

CAPITULO III .....	55
ANALISIS DE CONVERSORES DC-DC .....	55
3.1.  SIMULACIONES DE CONVERSORES CON SCILAB .....	55
3.1.1.  Simulación Conversor Tipo <i>Buck</i> .....	57
3.1.2.  Simulación Conversor Tipo <i>Boost</i> .....	59
3.1.3.  Simulación Conversor Tipo <i>Buck-Boost</i> .....	61
3.1.4.  Simulación Conversor Tipo <i>Cuk</i> .....	64
3.1.5.  Simulación Conversor Tipo <i>Sepic</i> .....	68
3.2.  SIMULACIONES DE CONVERSORES CON OPENMODELICA.....	73
3.2.1  Simulación Conversor Tipo <i>Buck</i> .....	73
3.2.2  Simulación Conversor Tipo <i>Boost</i> .....	75
3.2.3  Simulación Conversor Tipo <i>Buck-Boost</i> .....	77
3.2.4  Simulación Conversor Tipo <i>Cuk</i> .....	81
3.2.5  Simulación Conversor Tipo <i>Sepic</i> .....	88
3.3.  PROPUESTA DE CONVERTIDOR OPTIMIZADO.....	96
3.3.1  Simulaciones.....	105
CAPITULO IV .....	110
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	110
4.1  CONCLUSIONES. ....	110
4.2  RECOMENDACIONES .....	112
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	113
ANEXOS .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>



## INDICE DE FIGURAS

Figura. 1. 1. Sistemas Energía Renovable.....	2
Figura. 1. 2. Interface electrónica entre Fuente y Carga.....	3
Figura. 1. 3. Conversión de Niveles de Tensión.....	4
Figura. 2. 1. Diagrama de Bloques Convertidor de Potencia .....	7
Figura. 2. 2. Conversor de Potencia DC-DC .....	9
Figura. 2. 3. Topología Básica del Convertidor DC-DC.....	10
Figura. 2. 4. Forma de onda de Salida del Conversor DC-DC .....	11
Figura. 2. 5. Esquema del Convertidor DC-DC tipo <i>Buck</i> .....	12
Figura. 2. 6. Convertidor Tipo Buck intervalo ton .....	13
Figura. 2. 7. Convertidor Tipo Buck intervalo toff .....	14
Figura. 2. 8. Respuesta del Conversor Tipo Buck.....	14
Figura. 2. 9. Convertidor Tipo Buck intervalo toff modo de conducción discontinua .....	17
Figura. 2. 10. Formas de Onda Conversor tipo Buck en modo de conducción discontinuo .....	17
Figura. 2. 11. Corriente en el inductor en el límite de conducción continua/discontinua.....	18
Figura. 2. 12. Esquema del Convertidor DC-DC tipo <i>Boost</i> .....	19
Figura. 2. 13. Conversor Tipo Boost intervalo ton .....	20
Figura. 2. 14. Conversor Tipo Boost intervalo toff .....	20
Figura. 2. 15. Respuesta del Conversor tipo <i>Boost</i> .....	21
Figura. 2. 16. Convertidor Tipo Boost intervalo toff modo de conducción discontinua .....	22
Figura. 2. 17. Formas de Onda Convertidor Boost en modo de conducción discontinua .....	23
Figura. 2. 18. Corriente en el inductor en el límite de conducción continua/discontinua.....	24
Figura. 2. 19. Convertidor DC-DC tipo Sepic.....	25
Figura. 2. 20. Convertidor tipo Sepic intervalo ton.....	26
Figura. 2. 21. Convertidor tipo Sepic intervalo toff.....	26
Figura. 2. 22. Convertidor DC-DC Tipo <i>Cuk</i> .....	29

Figura. 2. 23. Convertidor tipo <i>Cuk</i> intervalo ton .....	30
Figura. 2. 24. Convertidor Tipo <i>Cuk</i> intervalo toff .....	30
Figura. 2. 25. Formas de Onda Convertidor <i>Cuk</i> .....	31
Figura. 2. 26. Convertidor DC-DC tipo <i>Buck-Boost</i> .....	33
Figura. 2. 27. Convertidor tipo Buck-Boost intervalo ton .....	34
Figura. 2. 28. Convertidor tipo Buck-Boost intervalo toff .....	34
Figura. 2. 29. Formas de onda Convertidor tipo Buck-Boost.....	35
Figura. 2. 30. Convertidor Tipo Sepic intervalo toff modo de conducción Discontinua.....	40
Figura. 2. 31. Convertidor Tipo <i>Cuk</i> intervalo toff modo de conducción discontinuo .....	42
Figura. 2. 32. Convertidor Tipo Buck-Boost intervalo toff modo de conducción discontinuo .....	44
Figura. 2. 33. Ejemplo Lenguaje Modelica .....	45
Figura. 2. 34. Pantalla OMEdit Simulador Openmodelica .....	47
Figura. 2. 35. Botón Connect/Unconnect .....	48
Figura. 2. 36. Ventana propiedades de Simulación OpenModelica.....	49
Figura. 2. 37. Menú para ver detalles del Elemento .....	49
Figura. 2. 38. Pantalla Principal Scilab.....	51
Figura. 2. 39. Comando "who" Scilab.....	52
Figura. 3. 1. Respuesta Conversor Tipo Buck $\delta=0.5$ .....	58
Figura. 3. 2. Respuesta Conversor Tipo Buck $\delta=0.5$ (Señal Ampliada) .....	58
Figura. 3. 3. Respuesta Conversor Tipo Boost $\delta=0.5$ .....	60
Figura. 3. 4. Respuesta Conversor Tipo Boost $\delta=0.5$ (Señal Ampliada) .....	60
Figura. 3. 5. Respuesta Conversor Tipo Buck-Boost $\delta=0.34$ .....	62
Figura. 3. 6. Respuesta Conversor Tipo Buck-Boost $\delta=0.34$ (Señal Ampliada) ...	62
Figura. 3. 7. Respuesta Conversor Tipo Buck-Boost $\delta=0.5$ .....	63
Figura. 3. 8. Respuesta Conversor Tipo Buck-Boost $\delta=0.7$ .....	63
Figura. 3. 9. Respuesta Conversor Tipo <i>Cuk</i> $\delta=0.34$ .....	65
Figura. 3. 10. Respuesta Conversor Tipo <i>Cuk</i> $\delta=0.34$ (Señal Ampliada).....	65
Figura. 3. 11. Respuesta Conversor Tipo <i>Cuk</i> $\delta=0.5$ .....	66
Figura. 3. 12. Respuesta Conversor Tipo <i>Cuk</i> $\delta=0.7$ .....	67
Figura. 3. 13. Respuesta Conversor Tipo Sepic $\delta=0.34$ .....	69

Figura. 3. 14. Respuesta Conversor Tipo Sepic $\delta=0.34$ (Señal Ampliada) .....	70
Figura. 3. 15. Respuesta Conversor Tipo Sepic $\delta=0.5$ .....	71
Figura. 3. 16. Respuesta Conversor Tipo Sepic $\delta=0.7$ .....	72
Figura. 3. 17. Tensión en el Capacitor en el Conversor Tipo Buck $\delta=0.5$ .....	74
Figura. 3. 18. Corriente en el Inductor en el Conversor Tipo Buck $\delta=0.5$ .....	74
Figura. 3. 19. Tensión en el Capacitor en el Conversor Tipo Boost $\delta=0.5$ .....	76
Figura. 3. 20. Corriente en el Inductor en el Conversor Tipo Boost $\delta=0.5$ .....	76
Figura. 3. 21. Tensión en el Capacitor en el Conversor Tipo Buck-Boost $\delta=0.34$ ..	78
Figura. 3. 22. Corriente en el Inductor en el Conversor Tipo Buck-Boost $\delta=0.34$ ..	78
Figura. 3. 23. Tensión en el Capacitor en el Conversor Tipo Buck-Boost $\delta=0.5$ ..	79
Figura. 3. 24. Corriente en el Inductor en el Conversor Tipo Buck-Boost $\delta=0.5$ ..	79
Figura. 3. 25. Tensión en el Capacitor en el Conversor Tipo Buck-Boost $\delta=0.7$ ..	80
Figura. 3. 26. Corriente en el Inductor en el Conversor Tipo Buck-Boost $\delta=0.7$ ..	80
Figura. 3. 27. Respuesta Conversor Tipo Cuk $\delta=0.34$ .....	83
Figura. 3. 28. Respuesta Conversor Tipo Cuk $\delta=0.5$ .....	85
Figura. 3. 29. Respuesta Conversor Tipo Cuk $\delta=0.7$ .....	87
Figura. 3. 30. Respuesta Conversor Tipo Sepic $\delta=0.34$ .....	90
Figura. 3. 31. Respuesta Conversor Tipo Sepic $\delta=0.5$ .....	93
Figura. 3. 32. Respuesta Conversor Tipo Sepic $\delta=0.7$ .....	96
Figura. 3. 33. Conversor Sepic incluido resistencias parásitas .....	97
Figura. 3. 34. Curvas Características de Corriente y Voltaje del semiconductor	101
Figura. 3. 35. Curvas Características del Mosfet. Funcionamiento Ideal .....	104
Figura. 3. 36. Respuesta del Mosfet.....	106
Figura. 3. 37. Respuesta Amplificada del Mosfet.....	106
Figura. 3. 38. Respuesta Conversor Sepic. Modelo Real.....	108
Figura. 3. 39. Ampliación Respuesta Conversor Sepic. Modelo Real .....	108
Figura. 3. 40. Corrientes de todos los elementos del Conversor Sepic.....	109
Figura. 3. 41. Corrientes Ampliadas de todos los elementos del Conversor Sepic .....	109

## INDICE DE TABLAS

Tabla. 2. 1. Funciones Básicas de Scilab.....	53
---	----

---

## GLOSARIO

**Electrónica de Potencia.-** Aplicación de la electrónica de estado sólido para el control y la conversión de energía eléctrica.

**Tensión.-** Es una magnitud física que cuantifica la diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos, su unidad es el voltio (V). La polaridad de la tensión viene determinada por el sentido que sigue la corriente (cargas positivas), que es opuesto al sentido que siguen los electrones (cargas negativas); esto es, desde el punto con mayor potencial hacia el que tiene menor potencial.

**Corriente.-** Es el flujo de carga por unidad de tiempo que recorre un material. Se debe al movimiento de los electrones en el interior del material. Su unidad se denomina amperio (A).

**AC.-** (Alternating current), corriente alterna.

**DC.-** (Direct current), corriente continua.

**Conmutación.-** Paso de un estado a otro

**Ciclo de trabajo.-** Ciclo útil o régimen de trabajo es la fracción de tiempo donde la señal es positiva o se encuentra en estado activo

**Amplitud.-** Es la distancia máxima entre el punto más alejado de una onda y el punto de equilibrio o medio.

**Frecuencia.-** es una magnitud que mide el número de repeticiones por unidad de tiempo de cualquier fenómeno o suceso periódico, la frecuencia se mide en hercios (Hz)

**Periodo.-** Es el mínimo lapso que separa dos instantes en los que el sistema se encuentra exactamente en el mismo estado: mismas posiciones, mismas velocidades, mismas amplitudes. Así, el periodo de oscilación de una onda es el tiempo empleado por la misma en completar una longitud de onda. En términos breves es el tiempo que dura un ciclo de la onda en volver a comenzar.

# CAPITULO I

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 ANTECEDENTES

La electrónica de potencia en términos generales es la encargada de procesar y controlar el flujo de energía eléctrica mediante el suministro de voltajes y corrientes en una forma óptima para las cargas. Este procesamiento puede constituirse en conversiones de corriente o regulación de la misma los parámetros procesados serán voltaje, corriente, frecuencia, según lo requiera la carga.<sup>1</sup>

En la década de los 80 se pasó del concepto de conversión y control de la energía eléctrica al concepto de modulación de flujo de energía utilizando convertidores conmutados, dotados de elementos conmutadores estáticos del tipo semiconductores de potencia. Los cuales tienen la capacidad de trabajar a frecuencias de conmutación elevadas y soportar potencias relativamente elevadas. Así, los convertidores de energía eléctrica que se estudian en el ámbito de la electrónica de potencia se denominan convertidores estáticos.

Hoy por hoy, la electrónica de potencia ha cobrado una trascendental importancia debido al avance de la tecnología, tanto en el área de la microelectrónica como en el área de los semiconductores permitiendo mejorar la

---

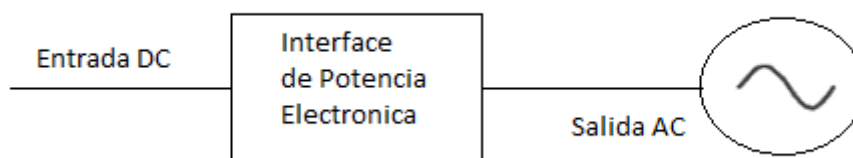
<sup>1</sup> Rashid, Muhammad, *Electrónica de Potencia*, Tercera edición, 2004

capacidad de manejo de voltaje así como la velocidad de conmutación de los elementos semiconductores de potencia que son necesarios para los convertidores de potencia.

En la actualidad, se está creando una conciencia ambiental que busca como objetivo optimizar el uso de la energía reduciendo pérdidas lo mayor posible. Debido a dicha preocupación por el medio ambiente y en combinación con el aumento del precio de la energía se ha logrado establecer el ahorro energético y la eliminación de pérdidas de energía como una prioridad. Claramente se puede observar esto con la introducción de lámparas fluorescentes al mercado para obtener mayor eficiencia.

Esta misma conciencia ecológica ha traído nuevos avances en los cuales es indispensable el uso de estos procesadores de energía. Uno de estos avances son los vehículos híbridos los cuales utilizan en parte energía eléctrica para su funcionamiento. Estos vehículos crean un gran impacto ambiental ya que reducen la emisión de CO<sub>2</sub>. Incluso en los vehículos convencionales se ve la necesidad de los convertidores de energía para transformar los niveles de voltaje de la batería para proporcionar los niveles necesarios para el automóvil.<sup>2</sup>

Energías renovables como el sol o el viento van de la mano con los convertidores de potencia ya que se necesita una interface entre la energía recibida y la carga en la cual va a ser ocupada. En la Figura. 1.1. se muestra esta interface necesaria.



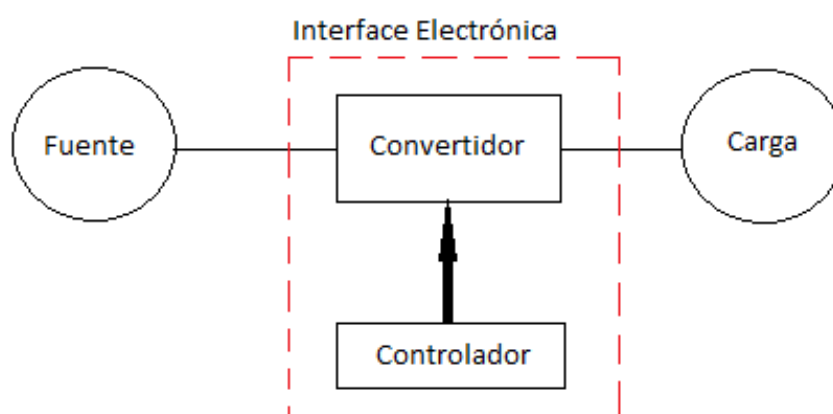
**Figura. 1. 1. Sistemas Energía Renovable**

Hoy en día, a través del procesamiento que se brinda a la energía se logra obtener una máxima eficiencia energética. La disciplina de procesar la energía

<sup>2</sup> Mohan, Ned, *First Course on Power Electronics and Drives*, edición 2003

cobra cada vez más importancia debido a la eficiencia y versatilidad de los convertidores eléctricos capaces de alterar la tensión y corriente que reciben para optimizarla para usos específicos.

La electrónica de potencia no solamente ha cobrado importancia debido a la optimización energética, sino también debido a que esta funciona como una interface entre las fuentes de energía y las distintas cargas eléctricas existentes, ya que convirtiendo las tensiones y corrientes de una forma a otra facilita la transferencia de energía. En la Figura. 1.2. se muestra el manejo de la transferencia de energía desde la fuente de poder hasta la carga, en dicho proceso la conversión de tensión y corriente debe ser obtenida con la mayor eficiencia energética posible



**Figura. 1. 2. Interface electrónica entre Fuente y Carga**

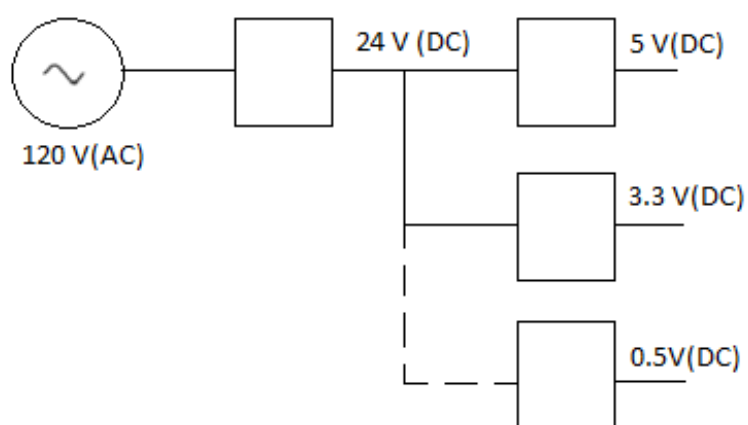
En un mundo industrializado, el elemento fundamental para realizar cualquier actividad es la energía. Sin embargo, las cargas que se presentan en estas circunstancias son en su mayor parte no lineales, para ayudar a trabajar con estas cargas se han introducido en el mundo los convertidores eléctricos de potencia ya que estos mejoran notablemente el consumo de energía, mejorando así también el rendimiento de los equipos y evitando que estos sufran algún tipo de daño.

Se está volviendo muy común generar energía eléctrica de diversas formas y convertirla en otra para poder utilizarla. Como por ejemplo el uso de fuentes



renovables de energía, bancos de baterías y la transmisión de energía eléctrica en corriente continua (DC), poniendo a disposición de los usuarios una determinada tensión. Sin embargo, los principales usos para estas señales son presentadas en equipos electrónicos que trabajan a tensiones y frecuencias diferentes a las disponibles, es ahí cuando la utilidad en los convertidores es evidente, para acondicionar estas señales a las necesarias en los equipos.

Un ejemplo claro de la necesidad de dar tratamiento a las señales eléctricas para obtener distintos niveles de voltaje, son las computadoras personales. Estos dispositivos electrónicos, así como la mayoría de aparatos electrónicos, requieren de niveles de tensión DC bajos para el funcionamiento de los distintos componentes internos. Por lo tanto requieren una conversión inicial que transforme la corriente alterna de línea en corriente continua regulada de menor amplitud por ejemplo 12 o 24V. Sin embargo, un computador no requiere únicamente de un nivel de tensión, debido a esto, se realiza otra serie de conversiones que reducen el voltaje por ejemplo a 5V para ciertos elementos de las tarjetas internas del computador. En la Figura.1.3 se muestra la conversión de energía que se debe realizar para la alimentación de los distintos elementos internos de un computador.



**Figura. 1. 3. Conversión de Niveles de Tensión**

## 1.2 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

La necesidad de distintas formas de energía eléctrica así como las diferentes aplicaciones para las que son destinadas impulsan el desarrollo del campo de la conversión de energía. Este desarrollo ayuda no solamente a mejorar el desempeño y rendimiento de maquinaria sino que además mejoran la calidad de la energía utilizada, es por esto que se ha visto la importancia de buscar mejores y más óptimos dispositivos electrónicos que permitan realizar estas conversiones, permitiendo un buen desempeño de equipos.

Si bien es cierto, en el mercado se proporciona una gran variedad de convertidores, los existentes presentan ciertos inconvenientes. Los convertidores actuales que presentan un alto rendimiento tienen el inconveniente de introducir una gran cantidad de armónicos, mientras que los convertidores que no introducen una alta cantidad de armónicos son de muy bajo rendimiento, estos inconvenientes presentan la necesidad de desarrollar una topología de mayores prestaciones para un convertidor que tenga un buen rendimiento e introduzca la menor cantidad de armónicos posibles.

Con la finalidad de desarrollar un convertidor con mejores prestaciones a los existentes es fundamental en primer lugar un estudio detallado de las topologías presentes hasta la actualidad, es ahí donde radica la importancia de este documento.

Entender el funcionamiento de un convertidor significa, poder predecir en todo momento en qué estado se encuentra, cómo evolucionan sus variables de estado real y en que instante cambiará de estado. Si bien es cierto, es posible realizar el estudio de un convertidor sin la ayuda de un simulador, esta tarea resultaría demasiado compleja. Por este motivo los simuladores son una herramienta necesaria para su estudio y análisis de su funcionamiento.<sup>3</sup>

---

<sup>3</sup> Casaravilla, Chaer R., "Simulador Didáctico de Circuitos de Electrónica de Potencia", <http://www3.euitt.upm.es/taee/Congresosv2/1994/papers/1994S1D05.pdf>

## **1.3 OBJETIVOS DEL PROYECTO**

### **1.3.1 Objetivo Principal**

Analizar las diferentes topologías de convertidores de potencia DC-DC, en cuanto a su comportamiento dinámico.

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- Establecer y analizar las distintas topologías de convertidores DC-DC existentes en la actualidad.
- Utilizar un simulador de sistemas físicos, Openmodelica, que permita plantear el modelado de cada uno de los convertidores.
- Analizar la respuesta dinámica de cada uno de los convertidores en Scilab.
- Plantear una mejora a uno de los convertidores en cuanto a su eficiencia y respuesta dinámica.

## CAPITULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1 CONVERTIDORES DE POTENCIA

Un convertidor de potencia es un módulo básico (bloque componente) de los sistemas de electrónica de potencia. Los convertidores usan dispositivos semiconductores de potencia (diodos, transistores, tiristores, SCR) controlados por señales electrónicas (circuitos de control) y elementos de almacenamiento de energía (inductores y capacitores). En la Figura. 2.1. Se muestra el diagrama de bloques del convertidor de potencia con la señal necesaria para el control del mismo.

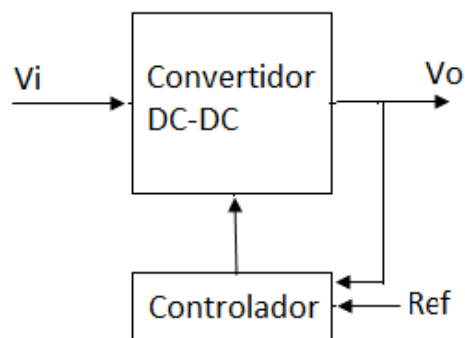


Figura. 2. 1. Diagrama de Bloques Convertidor de Potencia

Los convertidores de potencia permiten transformar el tipo de energía para que ésta sea utilizada en diferentes aplicaciones. De esta manera éstos se dividen en:

- Conversor de AC a DC (Rectificador)
- Conversor de DC a AC (Inversor)
- Conversor de DC a DC (Troceadores)
- Conversor de AC a AC (Cicloconvertidores)

Todos estos convertidores son denominados convertidores directos de energía, pues utilizan una única etapa de potencia para la conversión<sup>4</sup>. A pesar de que uno de los objetivos de los convertidores de potencia es transformar la energía con el mayor rendimiento posible, se producen pérdidas de energía debido a que no se trabaja con elementos ideales.

El principio de funcionamiento es el mismo para todos los convertidores conmutados, se basa en almacenamiento y transferencia de energía en ciclos de conmutación. Durante el primer intervalo del ciclo de trabajo, el convertidor almacena la energía en la bobina, transfiriendo en el segundo intervalo de trabajo esta energía al condensador. El control gobierna los estados de conducción y de bloqueo de los conmutadores.<sup>5</sup>

Con el objetivo de convertir energía eléctrica con la máxima eficiencia, los convertidores de potencia ideales poseen únicamente elementos que no presenten pérdidas es decir componentes que almacenan energía como condensadores y bobinas y elementos conmutadores.

Cada uno de los conversores indicados presenta una variedad de topologías, cada una diseñada para obedecer o cumplir especificaciones o requerimientos concretos a ciertas aplicaciones. Debido a esto, el estudio de todas los tipos de conversores resultaría ser demasiado extenso, por lo cual este

---

<sup>4</sup> Mohan, Ned, *First Course on Power Electronics and Drives*, edición 2003

<sup>5</sup> <http://cde05.etse.urv.es/pub/pdf/197pub.pdf>

documento se centrará únicamente en el estudio de los convertidores de potencia DC-DC.

## 2.2 CONVERTIDORES DE POTENCIA DC-DC

Los convertidores DC-DC son circuitos que controlan el flujo de energía entre dos sistemas de corriente continua. Se los puede definir como circuitos que controlan la carga y descarga de sus elementos pasivos almacenadores de energía (condensadores y bobinas) consiguiendo un cambio en el nivel de tensión continua, quedando el uso de energía determinado por el control de los elementos conmutadores.

Los convertidores de DC-DC son utilizados en sistemas de suministro de energía DC regulados y en aplicaciones de accionamientos motrices. Usualmente se utilizan los convertidores DC-DC para convertir una entrada DC no regulada en una salida DC controlada en un nivel de tensión deseado. En la Figura. 2.2 se muestra un conversor de potencia DC-DC teniendo como entrada un voltaje de DC no regulado que se obtiene mediante la rectificación de un voltaje de línea, por lo cual dicho voltaje fluctuará debido a los cambios en la magnitud del voltaje de línea recibido.

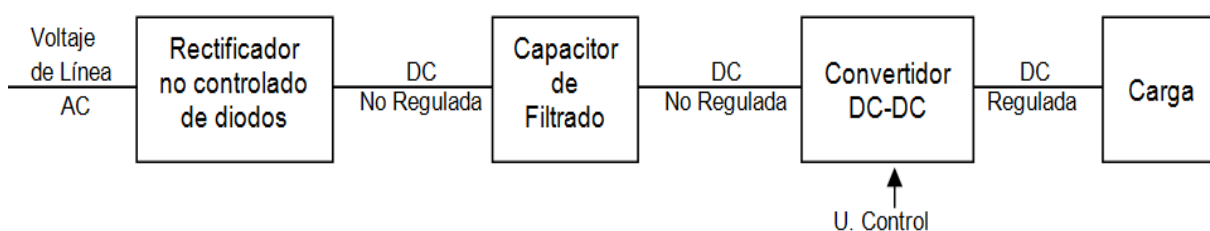


Figura. 2. 2. Conversor de Potencia DC-DC

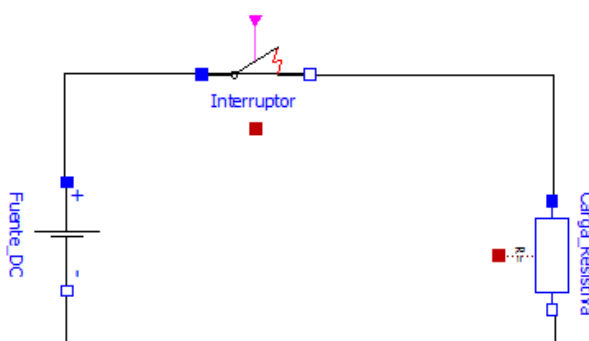
Los convertidores DC-DC forman parte del grupo de convertidores conmutados en alta frecuencia<sup>6</sup> este grupo de convertidores, son circuitos de

<sup>6</sup> Rashid, Muhammad, *Electrónica de Potencia*, Tercera edición, 2004

potencia donde los semiconductores conmutan a una frecuencia muy alta permitiendo además emplear filtros pasa-bajos para eliminar los componentes armónicos no deseados. Los semiconductores deberán entonces controlarse para conducir y bloquear.

Algunos ejemplos de aplicación de este tipo de convertidores son: fuentes de alimentación DC (*Switch Mode Power Supplies*, SMPS) para equipamiento electrónico, control de máquinas eléctricas de corriente continua, etc.

La Figura. 2.3. presenta el circuito más simple para un convertidor DC-DC, en la cual se observa a una carga resistiva alimentada por una fuente de tensión DC a través de un interruptor que conmuta a una frecuencia  $f=1/T$ .



**Figura. 2. 3. Topología Básica del Convertidor DC-DC**

El interruptor es pulsado durante un periodo de tiempo y abierto nuevamente, con esta acción se puede determinar el comportamiento del circuito. En la Figura. 2.4. se puede observar la respuesta de tensión obtenida. La forma de onda obtenida es rectangular y de la misma amplitud de la tensión de entrada. y su valor medio es igual a  $\delta V_i$ , siendo  $V_i$  la amplitud de la tensión de entrada. Esta expresión es obtenida en relación al trabajo del interruptor como se muestra en la ecuación (2.1), donde  $\delta$  representa el ciclo de trabajo (*duty cycle*), es decir la fracción de tiempo en la cual conduce el interruptor. Pocas aplicaciones aceptan una fuente con esas características debido a la alta cantidad de armónicos que presenta por lo cual es necesario agregar un filtro para obtener corriente y tensión en la carga constantes.

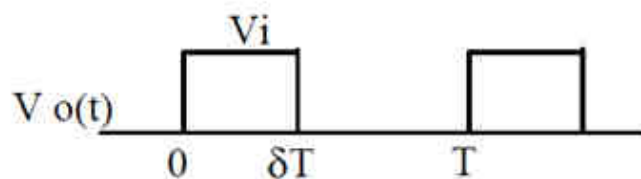


Figura. 2. 4. Forma de onda de Salida del Conversor DC-DC

$$V_o = \frac{1}{T} \int_0^T V_o(t) dt = \frac{1}{T} \left[ \int_0^{\delta T} V_i dt + \int_{\delta T}^T 0 dt \right]$$

$$V_o = \frac{\delta T}{T} V_i = \delta V_i \quad (2.1)$$

Los convertidores DC-DC pueden presentar dos modos de conducción, los cuales se dan debido a la relación entre el tiempo en que el conmutador se encuentra cerrado, y el tiempo necesario para que el elemento almacenador de energía (ej. bobina) descargue totalmente la energía almacenada previamente<sup>7</sup>. Estos modos de conducción son:

- *Modo de Conducción Continua (MCC)* Donde la intensidad que fluye por la carga fluctúa entre un valor máximo y mínimo, pero nunca llega a anularse. Esto se debe a que el conmutador deberá estar bloqueado un intervalo de tiempo que permita a la intensidad en la carga no hacerse cero. De este modo, al comenzar el siguiente periodo la intensidad podrá comenzar desde un valor inicial
- *Modo de Conducción Discontinua (MCD)* La intensidad en la carga se hace nula en un momento determinado durante el cual el interruptor está abierto. El tiempo que permanece abierto el interruptor es mayor que el tiempo que puede estar el elemento almacenador de energía cediendo energía, con lo que al iniciarse el siguiente periodo la intensidad en la carga partirá de cero.

<sup>7</sup> [http://tec.upc.es/el/TEMA-1%20EP%20\(v1\).pdf](http://tec.upc.es/el/TEMA-1%20EP%20(v1).pdf)



Existen varias topologías de convertidores DC-DC, las más conocidas son convertidores tipo *boost*, *buck*, *buck-boost*, *sepic* y *cuk*. De las topologías mencionadas solamente los tipos *boost* y *buck* son básicas de los conversores DC-DC, las otras son combinaciones o adaptaciones de estas topologías básicas.

## 2.3 TIPOS DE CONVERTIDORES DC-DC

### 2.3.1 Convertidores *Buck*

También conocido como convertidor reductor, llamado de esta manera debido a que siempre se cumple que la tensión de salida es igual o menor a la tensión de entrada. En la Figura. 2.5. se puede observar el esquema de este convertidor.

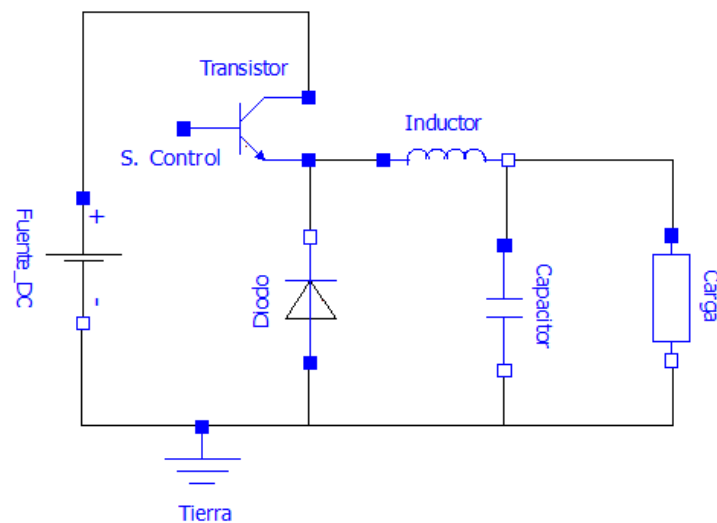


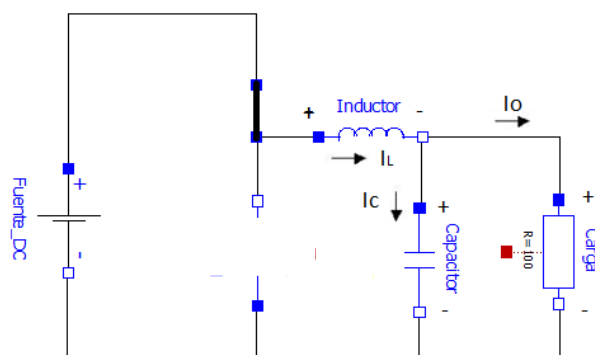
Figura. 2. 5. Esquema del Convertidor DC-DC tipo *Buck*

El transistor conmuta a una frecuencia  $f = 1/T$ . Como se mencionó anteriormente, en el convertidor se distinguen dos modos de operación, uno cuando la corriente del inductor se anula y otro cuando mantiene una corriente mínima sin llegar a anularse. Para el estudio del convertidor ideal se tomará en cuenta al transistor como un interruptor.

- **Modo de Conducción Continua**

Dentro de éste modo la intensidad que fluye por el inductor se mantendrá entre un valor máximo y mínimo sin llegar a anularse.

El interruptor es cerrado en  $t=0$  y éste empieza a conducir como se muestra en la Figura. 2.6. Como la tensión de salida es menor que la tensión de entrada, la corriente que pasa por el inductor será creciente durante este intervalo. La corriente que circula por el interruptor es igual a la corriente de la bobina y el voltaje de la misma es positivo ( $V_i - V_o$ ). Durante este periodo de tiempo el diodo se halla polarizado inversamente por lo cual éste no conduce.



**Figura. 2. 6. Convertidor Tipo Buck intervalo ton**

Después de un tiempo el interruptor es abierto, como se muestra en la Figura. 2.7. en ese momento el diodo comienza a conducir manteniendo de esta manera la continuidad de corriente por la bobina, la tensión de la bobina en este momento será negativa ( $-V_o$ ) y por lo tanto la corriente que circula por la misma será decreciente.

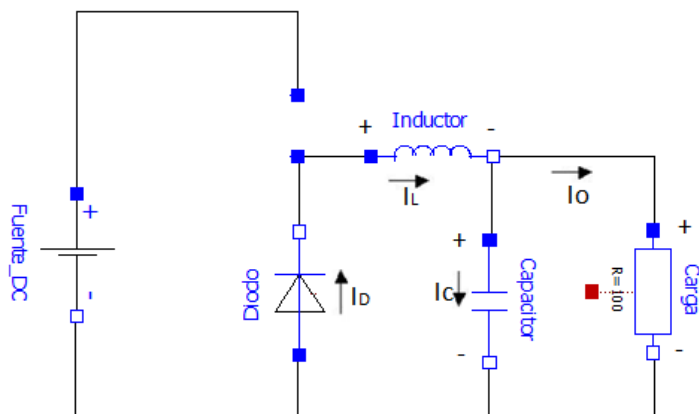


Figura. 2. 7. Convertidor Tipo Buck intervalo toff

En la Figura. 2.8. se muestra en primer lugar la tensión y corriente obtenida en la bobina durante un periodo de tiempo, se muestra además la forma de onda de la corriente que atraviesa por el interruptor ( $i_S$ ) y la corriente que pasa por el diodo ( $i_{Df1}$ ). Debido a que en estado estable las formas de onda de un ciclo deben repetirse en el siguiente y recordando que el inductor es un cortocircuito en DC, es decir que el valor medio del voltaje en el mismo debe ser cero, esto implica que tanto el área positiva como negativa de la forma de onda del voltaje en el inductor deben ser iguales<sup>8</sup> como se expresa en la ecuación (2.2).

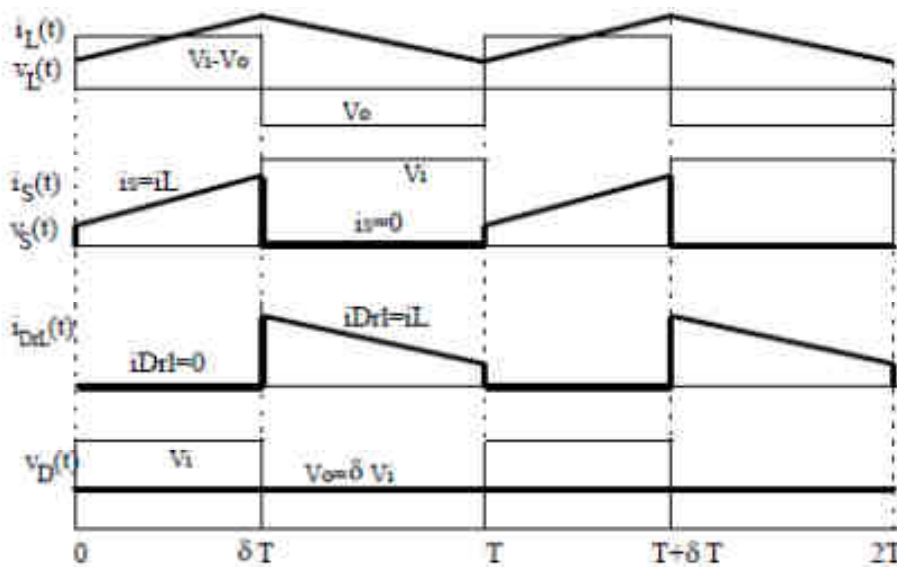


Figura. 2. 8. Respuesta del Conversor Tipo Buck

<sup>8</sup> Mohan, Ned,Undeland, Tore, Robbins, William, *Electrónica de Potencia-convertidores, aplicaciones y diseño*, Tercera edición

$$(V_i - V_o)t_{on} = V_o(t_{off}) \quad (2.2)$$

$$\delta = \frac{t_{on}}{T} \quad (2.3)$$

$$t_{off} = T - t_{on} = T - \delta T \quad (2.4)$$

La ecuación (2.3) define el factor de trabajo de conmutación como la relación entre el tiempo que está encendido el interruptor y la duración del periodo.

Reemplazando las ecuaciones (2.3) y (2.4) en la ecuación (2.2) se obtiene la ecuación del convertidor para modo de conducción continua.

$$(V_i - V_o)\delta T = V_o(1 - \delta)T$$

$$V_o = \delta V_i \quad (2.5)$$

La ecuación (2.5) muestra que el voltaje de salida del convertidor varía linealmente con respecto al factor de trabajo  $\delta$  para un voltaje de entrada determinado, sin depender de otro componente del circuito. Este voltaje se muestra en la Figura. 2.8.

Si se asume que los elementos son ideales no habrá pérdida de energía lo que implica que la potencia de entrada y de salida son iguales de ésta manera se obtendrá la ecuación (2.6). la cual implica que el convertidor tipo *buck* equivale a un transformador de DC, cuya relación de transformación es el factor de trabajo o ciclo de trabajo ( $\delta$ ).<sup>9</sup> Debido a que el factor de trabajo  $\delta$  no puede ser mayor que 1, queda demostrado que este convertidor presenta a su salida un voltaje menor al presente en la entrada.

$$P_i = P_o$$

$$I_i V_i = I_o V_o$$

$$I_i V_i = I_o \delta V_i$$

<sup>9</sup> Mohan, Ned, Undeland, Tore, Robbins, William, *Electrónica de Potencia-convertidores, aplicaciones y diseño*, Tercera edición

$$I_i = \delta I_o \quad (2.6)$$

- **Modo de Conducción Discontinua**

El comportamiento del convertidor en modo de conducción continua se basa en asumir que la corriente que atraviesa el inductor no se anula. Sin embargo, si la corriente entregada a la carga es demasiado grande o si la inductancia es demasiado pequeña, esta condición no se cumplirá. Es ahí cuando entra a trabajar el modo de conducción discontinuo

Este modo de conducción presenta tres estados, los dos primeros son los mismos que en el modo de conducción continua como se muestra en la Figura. 2.6. y 2.7 y el último estado (Figura. 2. 9) se define cuando los elementos conmutadores como son el interruptor y el diodo se encuentran bloqueados (*off*) a la vez<sup>10</sup>.

El primer estado (Figura. 2.6.) como se mencionó anteriormente, se da en el periodo de tiempo que el interruptor permanece cerrado, en éste estado el interruptor conduce y el diodo no lo hace. Durante el segundo estado (Figura. 2.7) el interruptor permanece abierto, en este estado el interruptor no conduce corriente y el diodo si lo hace mientras el inductor descarga la energía almacenada. El último estado de este convertidor (Figura. 2.9) se establece cuando el inductor ha descargado toda la energía almacenada, en éste momento la corriente del inductor se anula, el interruptor sigue abierto de manera que no conduce corriente, y el diodo tampoco lo hace.

---

<sup>10</sup> <http://cde05.etse.urv.es/pub/pdf/197pub.pdf>

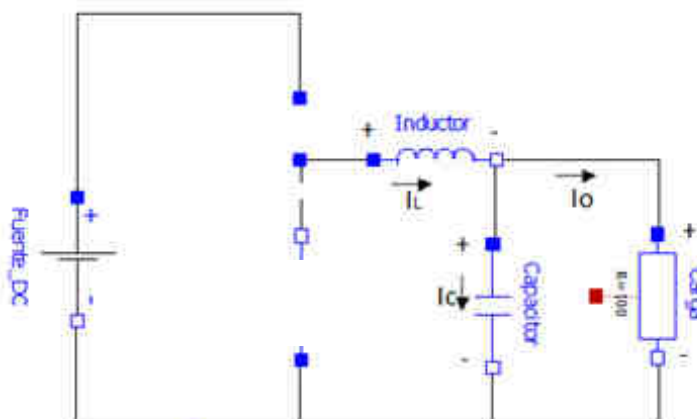


Figura. 2. 9. Convertidor Tipo Buck intervalo toff modo de conducción discontinua

En la Figura. 2.10. se pueden apreciar las formas de onda de corriente y voltaje tanto del inductor, del interruptor y del diodo del circuito, de ésta manera se puede observar el instante en el que la corriente del inductor se anula, es decir, llega al valor de cero. Se puede observar que debido a este fenómeno el valor de la tensión de salida es mayor en éste caso que durante el modo de conducción continua.

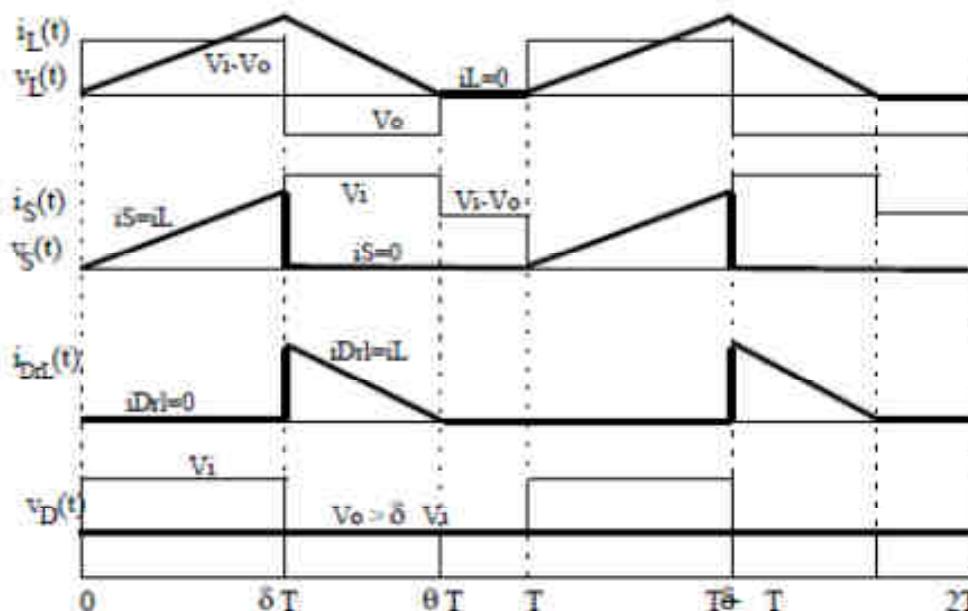


Figura. 2. 10. Formas de Onda Conversor tipo Buck en modo de conducción discontinuo

Partiendo de la ecuación (2.2) y tomando en cuenta que la corriente que se entrega a la carga se dará hasta el instante  $\theta T$  se puede obtener la ecuación (2.7), con la que es posible demostrar que la tensión de salida en el modo de

conducción discontinuo durante un periodo de tiempo es mayor que la tensión obtenida durante el modo de conducción continuo.

$$\begin{aligned} t_{off} &= \theta T - t_{on} \\ Vi\delta &= Vo\theta \end{aligned} \quad (2.7)$$

Para determinar el límite entre el modo de conducción continuo y discontinuo, se define que la corriente del inductor va a cero al final del periodo de apagado. Por lo tanto se puede definir al límite de la corriente media del inductor con ecuación (2.8), si la corriente de salida se vuelve menor que la obtenida mediante esta ecuación se estará trabajando en modo discontinuo.

$$I_L = \frac{1}{2} I_{Lpico} = \frac{t_{on}}{2L} (Vi - Vo) = \frac{\delta T}{2L} (Vi - Vo) \quad (2.8)$$

Reemplazando la ecuación (2.5) en el margen de conducción se tendrá la ecuación. (2.9) mostrando el límite de la corriente del inductor como función de la relación del trabajo, esta función se puede apreciar en la Figura. 2.11. De esta manera se puede determinar que el valor máximo de  $\delta$  requerido para un modo de conducción continua es de 0.5.

$$I_L = \frac{T Vi}{2L} \delta(1 - \delta) \quad (2.9)$$

$$I_{Lmax} = \frac{T Vi}{8L}$$

$$I_L = 4I_{Lmax} \delta(1 - \delta) \quad (2.10)$$

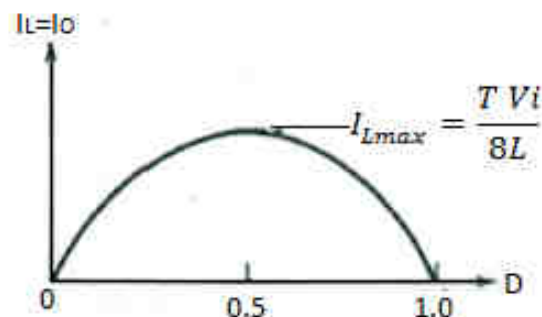


Figura. 2. 11. Corriente en el inductor en el límite de conducción continua/discontinua

Reemplazando el valor máximo de  $\delta$  para que el convertidor siga trabajando en modo continuo se puede especificar la corriente del inductor como se indica en la ecuación (2.10)

### 2.3.2 Convertidores *Boost*

El convertidor tipo *boost* es también conocido como convertidor elevador debido a que la tensión de salida obtenida del mismo es mayor a la tensión de entrada. La distribución de los elementos presentes en esta topología se muestra en la Figura. 2.12.

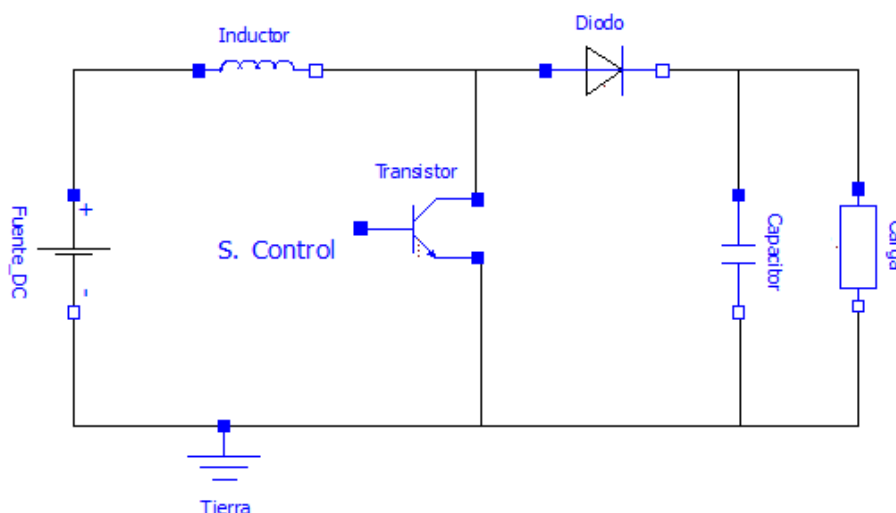


Figura. 2. 12. Esquema del Convertidor DC-DC tipo *Boost*

El transistor conmuta a una frecuencia  $f = 1/T$ . Para el estudio del convertidor tipo *boost* ideal, se tomará en cuenta al transistor como un interruptor.

- **Modo de Conducción Continua**

La corriente del inductor en este modo de conducción fluye en forma continua sin que ésta llegue a anularse.

Cuando el interruptor está cerrado como se muestra en la Figura. 2.13, el diodo está polarizado inversamente lo que aísla la etapa de salida, permitiendo



que la entrada provea energía al inductor. Un tiempo después, cuando el interruptor se abre mostrado en la Figura. 2.14, la etapa de salida recibe energía, tanto la almacenada por el inductor como la de fuente.

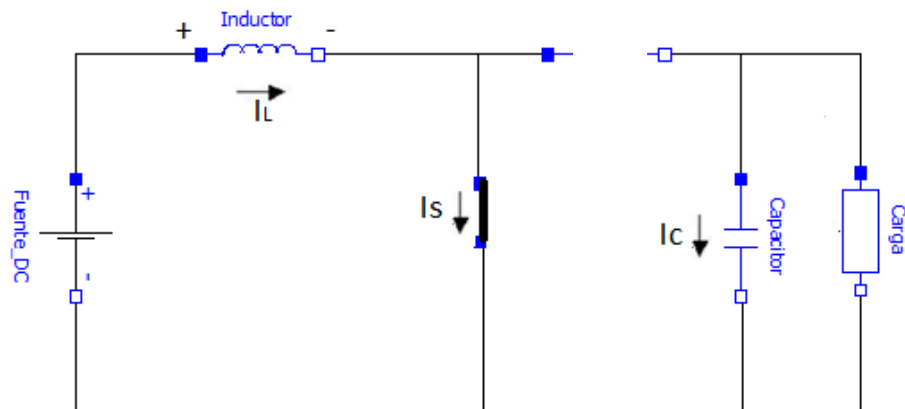


Figura. 2. 13. Conversor Tipo Boost intervalo ton

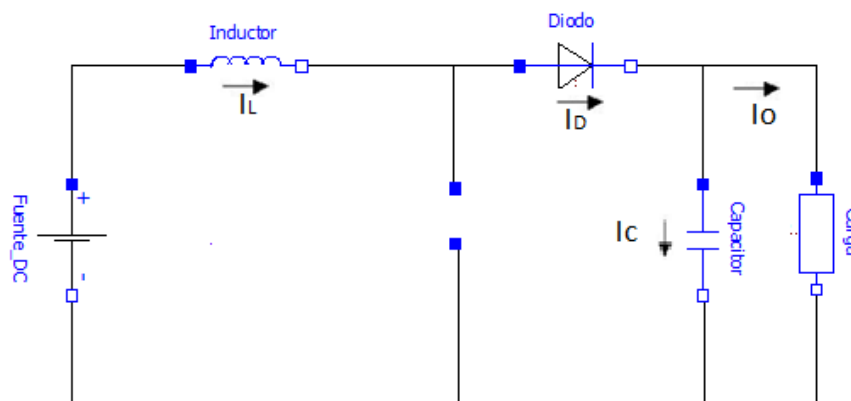


Figura. 2. 14. Conversor Tipo Boost intervalo toff

En la Figura. 2.15. se muestra en primer lugar la forma de onda obtenida para el voltaje y corriente de la bobina, se muestra además la forma de onda de la corriente que atraviesa por el interruptor ( $i_s$ ) y la corriente que pasa por el diodo ( $i_{D0}$ ). Ahora bien, se debe partir de la misma premisa que en el convertidor tipo *buck*, es decir que la integral de tiempo del voltaje del inductor a lo largo del periodo debe ser igualado a cero, por lo tanto se obtiene la ecuación (2.11). Esto quiere decir que la tensión de la bobina obtenida durante el tiempo que permanece encendido el interruptor ( $t_{on}$ ) debe ser igual a la tensión obtenida durante el tiempo que éste permanece apagado ( $t_{off}$ ).

$$V_i t_{on} = (V_i - V_o) t_{off} \quad (2.11)$$

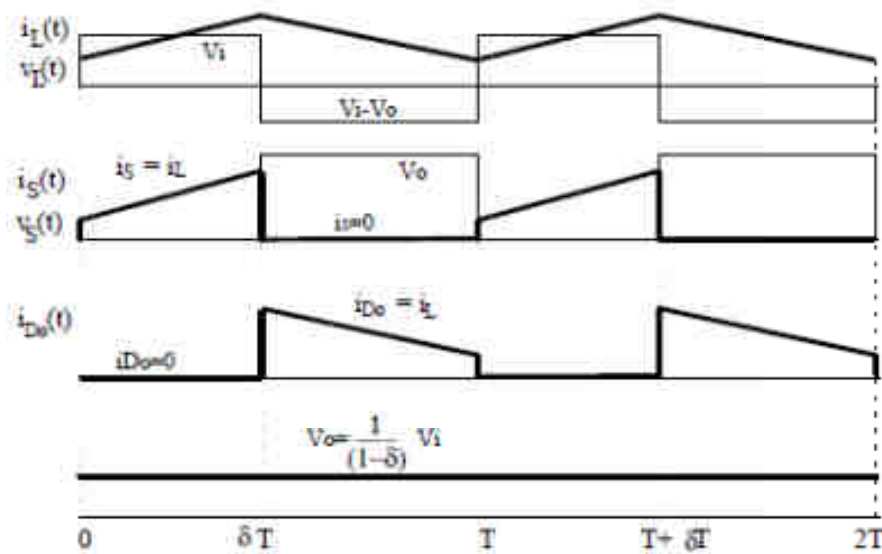


Figura. 2. 15. Respuesta del Convertor tipo Boost

Reemplazando las ecuaciones (2.3) y (2.4) en la ecuación (2.11) y simplificándola se obtiene la ecuación (2.12) la cual demuestra que el voltaje de salida obtenido por este convertidor es mayor que el voltaje de entrada del mismo.

$$V_i \delta T = (V_i - V_o)(1 - \delta)T$$

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1 - \delta} \quad (2.12)$$

Si se supone que el circuito no tiene pérdida alguna, se asumirá que la potencia de entrada es igual a la potencia de salida, desarrollando esta igualdad se obtendrá la relación de corriente de entrada y salida del circuito mostrada en la ecuación (2.13).

$$P_i = P_o$$

$$I_i V_i = I_o V_o$$

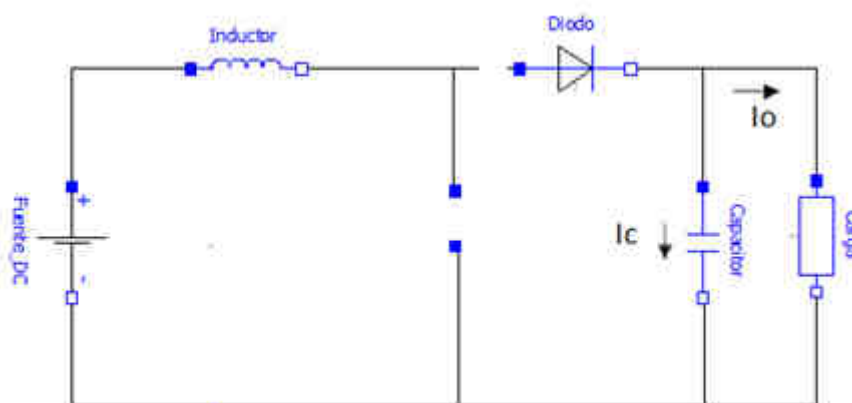
$$I_i(1 - \delta) = I_o \quad (2.13)$$

- **Modo de Conducción Discontinua**

Si la corriente entregada a la carga es demasiado grande o si la inductancia es demasiado pequeña, la corriente que atraviesa la inductancia se anula ocasionando que el circuito del convertidor entre en modo de conducción discontinua.

Este modo de conducción presenta tres estados, los dos primeros son los mismos que se presentan en el modo de conducción continua mostrados en la Figura. 2.13. y 2.14 y el último estado (Figura. 2.16) se define cuando los elementos conmutadores (interruptor y diodo) no conducen.

El primer estado (Figura. 2.13.) como se mencionó anteriormente, se da en el periodo de tiempo que el interruptor permanece cerrado, en este estado el interruptor conduce y el diodo no lo hace. Durante el segundo estado (Figura. 2.14) el interruptor permanece abierto, en este estado el interruptor no conduce corriente y el diodo si lo hace mientras el inductor descarga la energía almacenada. El último estado de este convertidor (Figura. 2.16) se establece cuando el inductor ha descargado toda la energía almacenada, en este momento la corriente del inductor se anula, y los elementos conmutadores tampoco conducen corriente.



**Figura. 2. 16. Convertidor Tipo Boost intervalo toff modo de conducción discontinua**

En la Figura. 2.17. se puede observar las formas de onda de corriente y voltaje tanto del inductor, del interruptor y del diodo del convertidor, en ellas se puede observar el instante en el que la corriente del inductor se anula, es decir, llega al valor de cero. De igual manera como en el caso del convertidor buck, la

tensión de salida obtenida en este modo de conducción es mayor a la tensión obtenida en el modo de conducción continua,

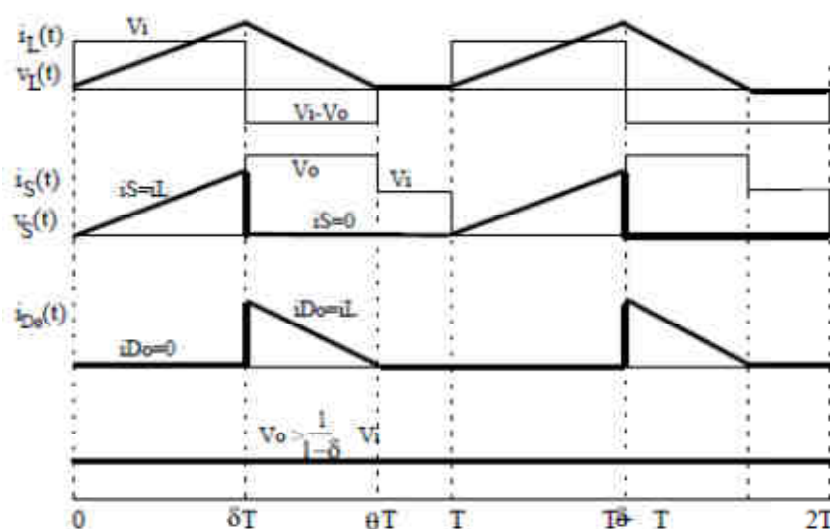


Figura. 2. 17. Formas de Onda Convertidor Boost en modo de conducción discontinua

Partiendo de la ecuación (2.11) y tomando en cuenta que la corriente que se entrega a la carga dura hasta el instante  $\theta T$  se puede obtener la ecuación (2.14), pudiendo demostrar de ésta manera que la tensión de salida en el modo de conducción discontinuo durante un periodo de tiempo es mayor que la tensión obtenida durante el modo de conducción continuo.

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{\theta}{\theta - \delta} \quad t_{off} = \theta T - t_{on} \quad (2.14)$$

El valor medio del límite de la corriente del inductor, se puede determinar con la forma de onda de la corriente cuando ésta va hacia cero al final del intervalo de apagado y viene dada por la ecuación (2.15)

$$I_L = \frac{1}{2} I_{L_{pico}} = \frac{V_i}{2L} t_{on} = \frac{TV_o}{2L} \delta(1 - \delta) \quad (2.15)$$

En un convertidor Boost la corriente del inductor es la misma corriente de entrada, de ésta manera reemplazando la ecuación (2.15) en la ecuación (2.13) se tendrá la expresión de la corriente límite de salida a la carga.

$$I_o = \frac{TV_o}{2L} \delta(1 - \delta)^2 \quad (2.16)$$

En la Figura. 2.18 se muestra la corriente de salida y corriente del inductor como función de la relación de trabajo mientras el voltaje de salida permanece constante. Al variar la relación de trabajo y mantener la tensión de salida constante implica que se debe variar también la tensión de entrada.

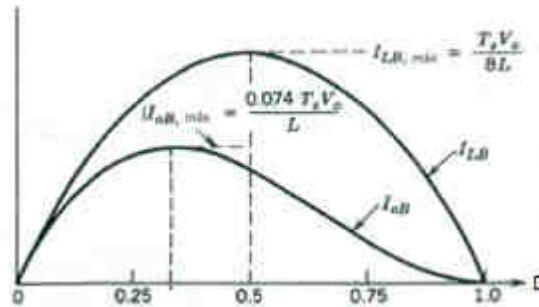


Figura. 2. 18. Corriente en el inductor en el límite de conducción continua/discontinua

En la Figura. 2.18 se puede observar que la corriente del inductor alcanza un valor máximo en  $\delta=0.5$  que es el límite entre el modo de conducción continua y discontinua. De la misma manera la corriente de salida tiene su punto máximo en un valor de  $\delta=0.333$ . Reemplazando estos valores en las ecuaciones se obtienen las siguientes expresiones:

$$I_{Lmax} = \frac{TV_o}{8L}$$

$$I_{o,max} = \frac{2 TV_o}{27 L} = 0.074 \frac{TV_o}{L}$$

Se puede expresar la ecuación (2.15) en términos de los valores máximos como se muestra en la ecuación (2.17)

$$I_L = 4\delta(1 - \delta)I_{Lmax} \quad (2.17)$$

De igual forma es posible expresar la corriente de salida en términos de los valores máximos que se pueden tener para que el convertidor trabaje en modo de conducción continua como se muestra en la ecuación (2.18)

$$I_o = \frac{27}{4} \delta(1 - \delta)^2 I_{o\max} \quad (2.18)$$

### 2.3.3 Convertidores Sepic

El convertidor tipo Sepic como se muestra en la Figura. 2.19. consta de cuatro elementos almacenadores de energía estos son: dos capacitores y dos inductores. La función de este convertidor es mantener una tensión de salida regulada frente a variaciones de tensión de entrada o de carga.

La tensión de salida de este convertidor puede ser de mayor o menor magnitud a la del voltaje de entrada del mismo y la polaridad de voltaje de salida es la misma de la tensión de entrada.

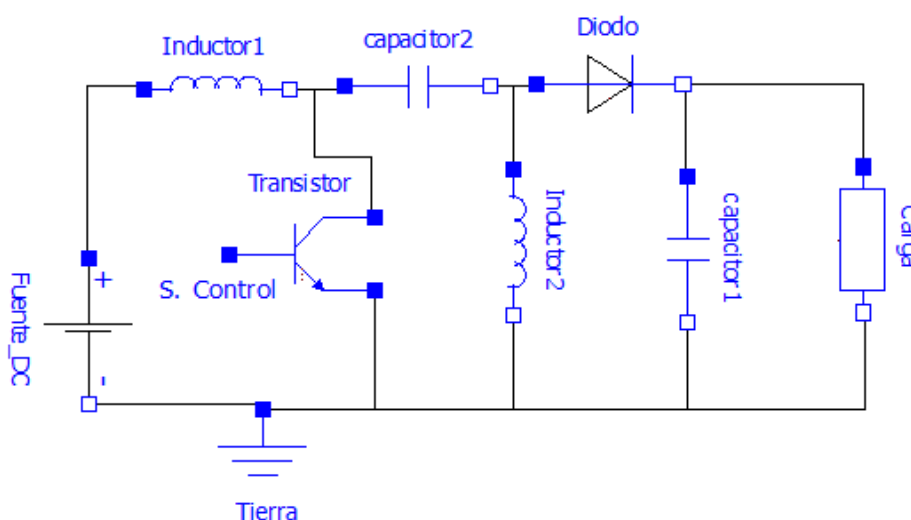


Figura. 2. 19. Convertidor DC-DC tipo Sepic

- **Modo de Conducción Continua**

El momento que el interruptor es cerrado (Figura. 2.20.), el inductor1 es alimentado, al mismo tiempo el diodo queda polarizado inversamente; por esta razón la corriente que cruza por la bobina crece linealmente, almacenando energía. En este momento el capacitor 1 alimenta al inductor 2 y el potencial del capacitor 2 es entregado a la carga.

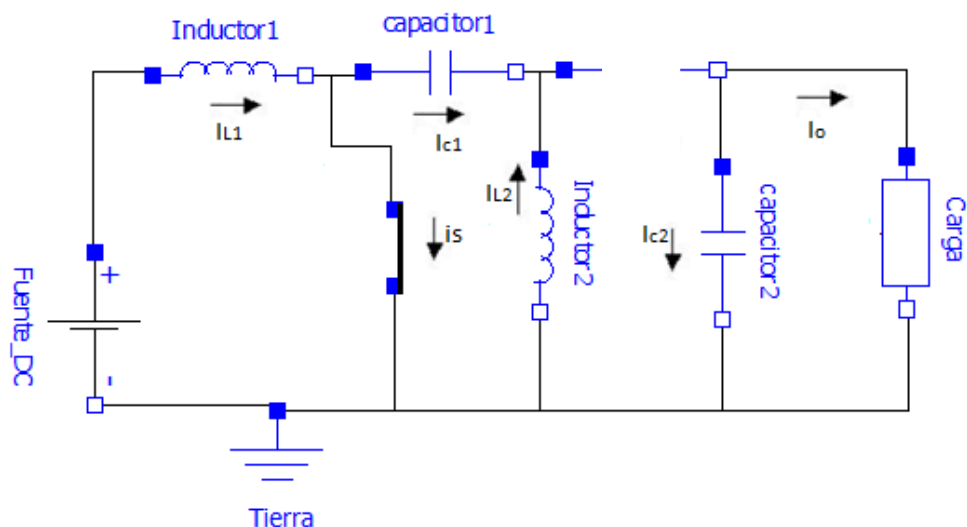


Figura. 2. 20. Convertidor tipo Sepic intervalo ton

Después de un intervalo de tiempo el interruptor se abre (Figura. 2.21.), y la energía almacenada en la bobina 1 junto con la energía de entrada son transferidas al capacitor 1. En éste intervalo de tiempo, el convertidor permite que la energía almacenada en el inductor 2 sea transferida al capacitor 2 y a la carga. Durante éste periodo el capacitor 1 funciona como medio de transferencia de energía desde la fuente a la carga<sup>11</sup>.

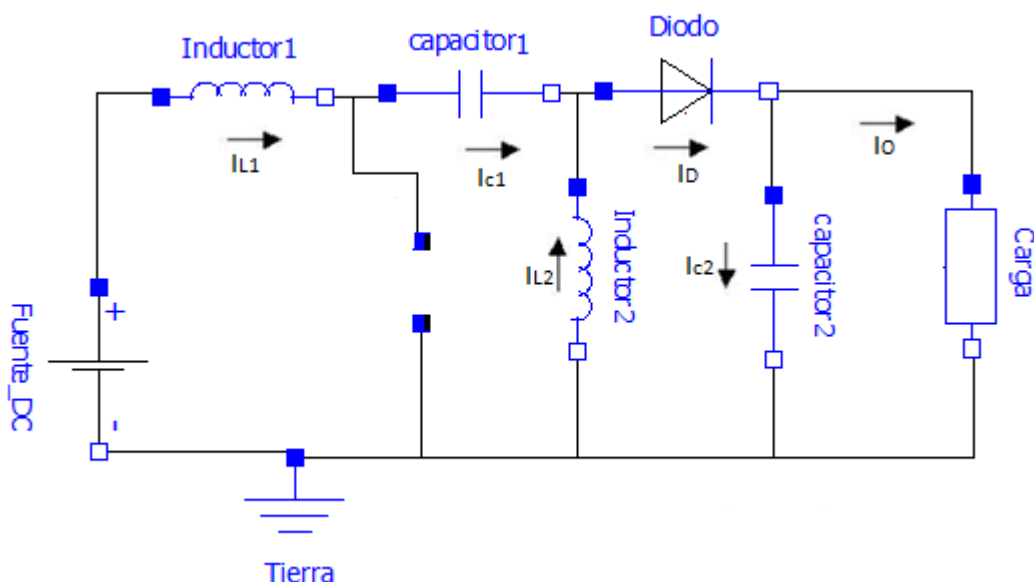


Figura. 2. 21. Convertidor tipo Sepic intervalo toff

11

Se toma en cuenta la premisa que los voltajes medios de los inductores deben igualar a cero, debido a esto se pueden establecer las ecuaciones (2.20). y (2.22).

Para el inductor 1 se tiene:

$$V_i t_{on} + (V_i - V_{C1})t_{off} = 0 \quad (2.19)$$

Reemplazando la ecuación (2.3) y (2.4) en la ecuación (2.19). se tiene:

$$\begin{aligned} V_i \delta T + (V_i - V_{C1})(1 - \delta)T &= 0 \\ V_{C1} &= \frac{1}{1 - \delta} V_i \end{aligned} \quad (2.20)$$

Para el inductor 2 se tiene:

$$(V_{C1} - V_o)t_{on} + (-V_o)t_{off} = 0 \quad (2.21)$$

Reemplazando la ecuación (2.3) y (2.4) en la ecuación (2.20). se tiene:

$$\begin{aligned} (V_{C1} - V_o)\delta T - V_o(1 - \delta)T &= 0 \\ V_{C1} &= \frac{1}{\delta} V_o \end{aligned} \quad (2.22)$$

Igualando la ecuación (2.20) y la ecuación (2.22). se obtiene la relación entre la tensión de entrada y la tensión de salida como se muestra en la ecuación. (2.23).

$$\begin{aligned} \frac{1}{1 - \delta} V_i &= \frac{1}{\delta} V_o \\ \frac{V_o}{V_i} &= \frac{\delta}{1 - \delta} \end{aligned} \quad (2.23)$$

Si se asume que la corriente media que atraviesa por el segundo capacitor es nula se tendrá que la corriente que atraviesa por el diodo es igual a la corriente de salida, con esto se puede determinar la ecuación (2.24) para



determinar la corriente que atraviesa por el inductor 1 en función del ciclo de trabajo.

$$i_D = i_o = \frac{V_o}{R}$$

$$i_{L1} = i_o \frac{V_o}{V_i} = i_o \frac{\delta}{1 - \delta} \quad (2.24)$$

De igual manera, si se asume que la corriente media que atraviesa por el primer capacitor es nula se tendrá que la corriente que atraviesa por el inductor 2 es igual a la corriente que atraviesa por el diodo y por lo tanto será igual a la corriente que atraviesa por la carga.

$$i_{L2} = i_\delta = i_o$$

Asumiendo que no existe pérdida de energía, es posible indicar que la potencia de entrada es igual a la potencia de salida, desarrollando esta igualdad se puede definir la relación entre la corriente de entrada y la de salida detallada en la ecuación (2.25).

$$P_i = P_o$$

$$I_i V_i = I_o V_o$$

$$I_i V_i = I_o \frac{\delta V_i}{1 - \delta}$$

$$\frac{I_o}{I_i} = \frac{1 - \delta}{\delta} \quad (2.25)$$

#### 2.3.4 Convertidores *Cuk*

El convertidor tipo *Cuk* es llamado de esta forma en honor a su inventor, su configuración es mostrada en la Figura. 2.22. Este convertidor proporciona un voltaje de salida regulado por polaridad negativa respecto al terminal común de voltaje de entrada. La función de este convertidor es mantener una tensión de salida regulada frente a variaciones de la tensión de entrada o de la carga. Un convertidor *Cuk* puede suministrar un voltaje de salida que puede ser menor o

mayor que el voltaje de entrada sin embargo la polaridad es opuesta a la del voltaje de entrada, es por ello que también se lo conoce como convertidor inversor

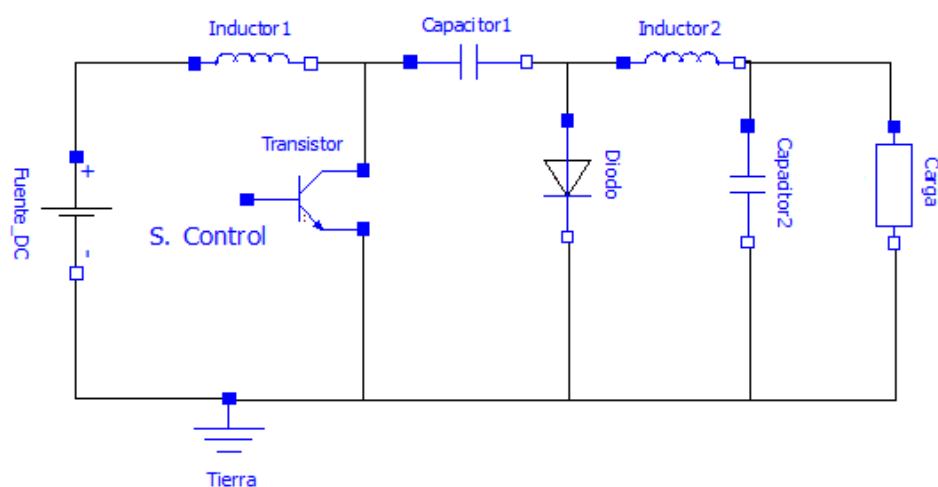


Figura. 2. 22. Convertidor DC-DC Tipo *Cuk*

De igual forma que los otros convertidores, este presenta dos modos de conducción.

- ***Modo de Conducción Continua***

Cuando el interruptor se cierra como se muestra en la Figura.2.23, la fuente se conecta al inductor 1, al mismo tiempo el diodo queda polarizado inversamente, debido a esto la intensidad que circula por el inductor 1 crece linealmente, almacenando energía. Al mismo tiempo el voltaje del capacitor 1 polariza inversamente al diodo. El capacitor 1 descarga la energía en el circuito formado por el capacitor 1, capacitor 2, la carga y el inductor 2.

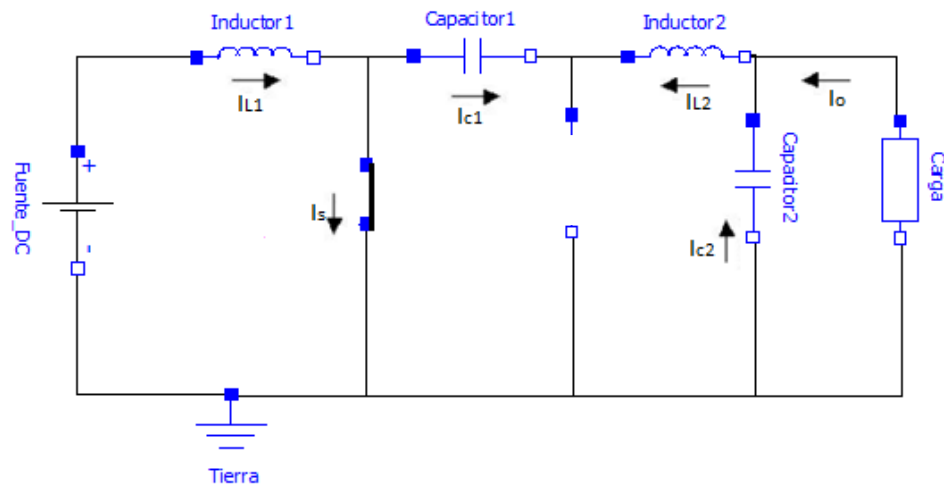


Figura. 2. 23. Convertidor tipo *Cuk* intervalo ton

Transcurrido un tiempo, el interruptor se abre como es mostrado en la Figura. 2.24., en ese momento la energía almacenada en el inductor 1 junto con la energía de la entrada se transfieren al condensador1. Durante éste periodo de tiempo la fuente no entrega ningún tipo de energía a la salida ocasionando que el inductor 2 permita la circulación de corriente hacia el capacitor2 y hacia la salida. El diodo y el interruptor proporcionan una conmutación sincrónica.

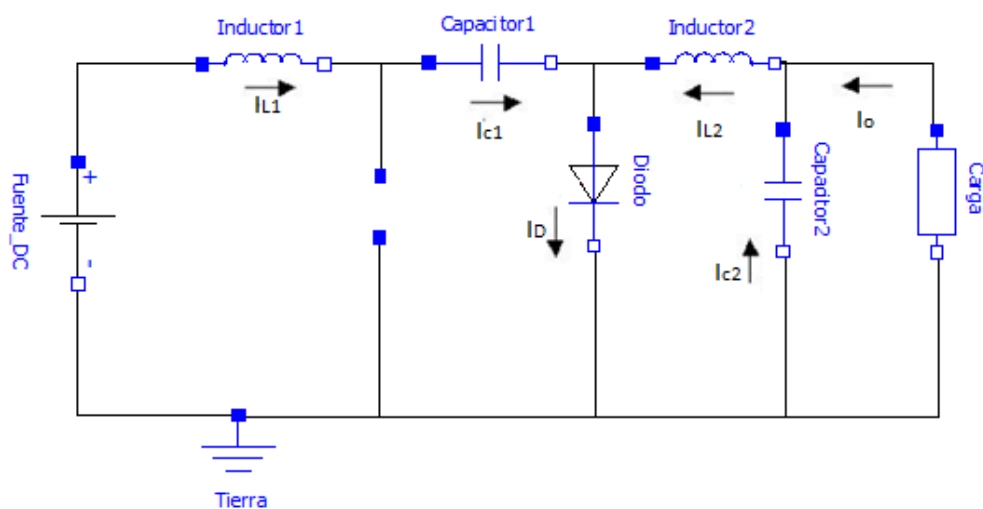


Figura. 2. 24. Convertidor Tipo *Cuk* intervalo toff

El capacitor 1 del circuito como el medio principal para almacenar y transferir la energía de la entrada a la salida. Se toma en cuenta la premisa que los voltajes medios de los inductores son cero, debido a esto se puede establecer la ecuación (2.26).

$$V_{c1} = V_i + V_o \quad (2.26)$$

En la Figura. 2.25. se observa las formas de onda de voltaje y corriente de los inductores del convertidor Cuk.

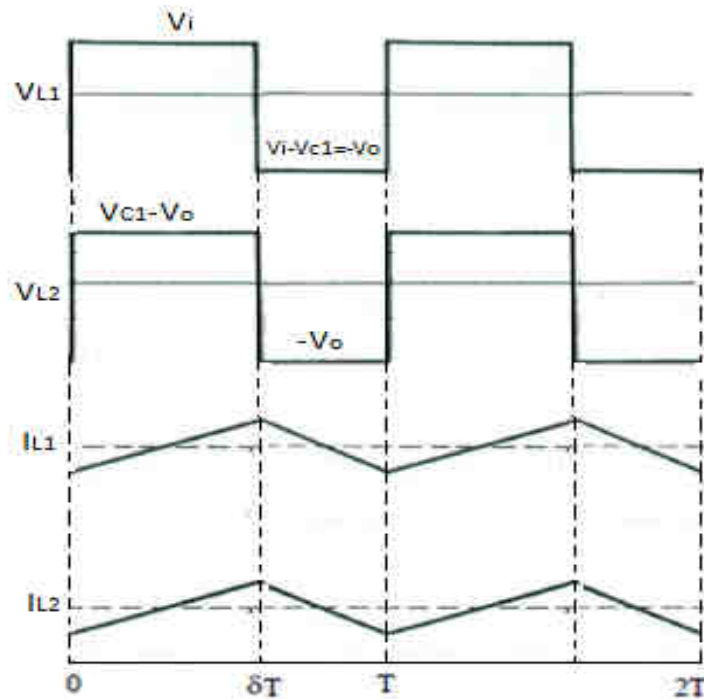


Figura. 2. 25. Formas de Onda Convertidor Cuk

Si se supone que el voltaje en el capacitor1 es constante, se puede equiparar la integral de los voltajes de las bobinas durante un periodo de esta manera se tendrá la Ecuación (2.28). y la ecuación (2.30).

Para el inductor 1 se tiene:

$$V_i t_{on} + (V_i - V_{c1})t_{off} = 0 \quad (2.27)$$

Reemplazando las ecuaciones (2.3) y (2.4) en la ecuación (2.27) se tiene:

$$V_i \delta T + (V_i - V_{c1})(1 - \delta)T = 0$$

$$V_{c1} = \frac{1}{1 - \delta} V_i \quad (2.28)$$

Para el inductor 2 se tiene:

$$(V_{c1} - V_o)t_{on} + (-V_o)t_{off} = 0 \quad (2.29)$$

Reemplazando las ecuaciones (2.3) y (2.4) en la ecuación (2.29).se tiene:

$$(V_{c1} - V_o)\delta T - V_o(1 - \delta)T = 0$$

$$V_{c1} = \frac{1}{\delta} V_o \quad (2.30)$$

Igualando la ecuación (2.28) y la ecuación (2.30) se obtiene la relación entre la tensión de entrada y la tensión de salida como se muestra en la ecuación (2.31).

$$\frac{1}{1 - \delta} V_i = \frac{1}{\delta} V_o$$

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{\delta}{1 - \delta} \quad (2.31)$$

Si se asume que no existe pérdida de energía, es posible indicar que la potencia de entrada es igual a la potencia de salida, desarrollando esta igualdad se puede definir la relación entre la corriente de entrada y la de salida detallada en la ecuación (2.32).

$$P_i = P_o$$

$$I_i V_i = I_o V_o$$

$$I_i V_i = I_o \frac{\delta V_i}{1 - \delta}$$

$$\frac{I_o}{I_i} = \frac{1 - \delta}{\delta} \quad (2.32)$$

### 2.3.5 Convertidor Buck-Boost

Un convertidor *buck-boost* también conocido como convertidor reductor-elevador se obtiene por medio de la conexión en cascada de los dos

convertidores básicos: el convertidor buck (reductor) y el convertidor boost (elevador) como se muestra en la Figura. 2.26.

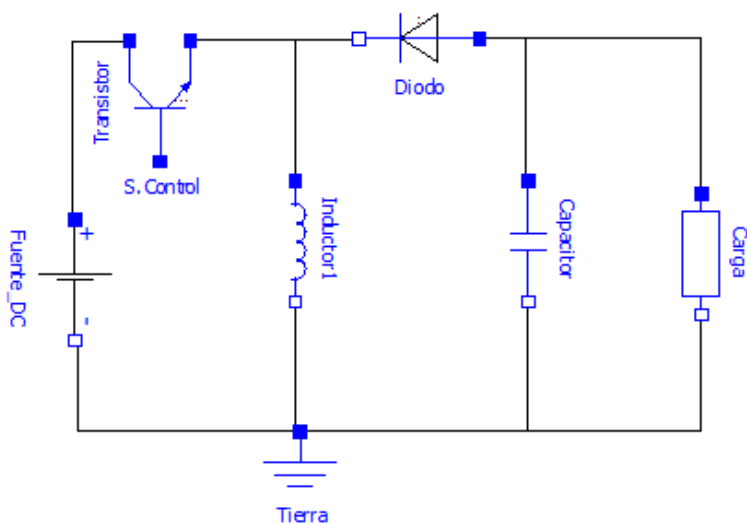


Figura. 2. 26. Convertidor DC-DC tipo *Buck-Boost*

La principal aplicación de un convertidor *buck-boost* es en fuentes de energía DC reguladas, donde puede preferirse una salida de polaridad negativa respecto de la terminal común del voltaje de entrada, y donde el voltaje de salida puede ser más alto o más bajo que el voltaje de entrada.

La razón de conversión de éste convertidor es dada por el producto de las razones correspondientes a los convertidores *boost* y *buck*.

- **Modo de Conducción Continua**

Cuando el interruptor es cerrado (Figura. 2.27.) la fuente provee de energía al inductor mientras el diodo es polarizado inversamente. Debido a esto, la intensidad que circula por la bobina crece linealmente logrando almacenar energía.

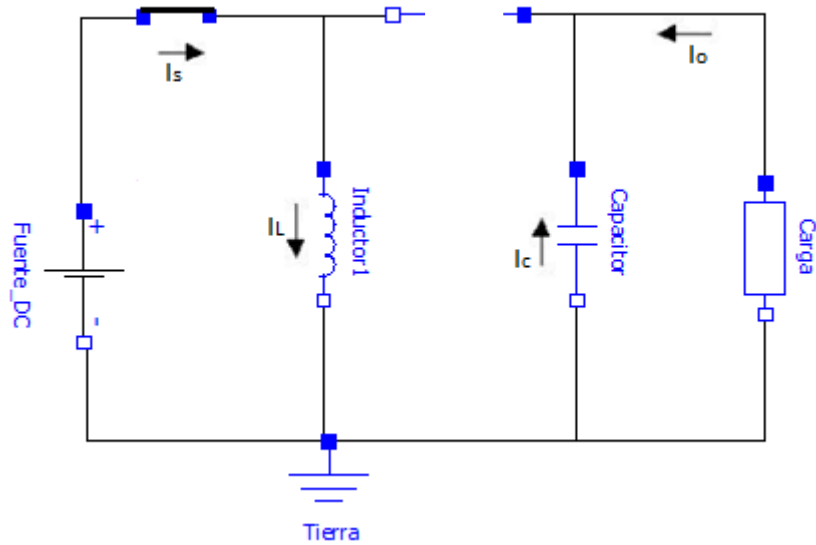


Figura. 2. 27. Convertidor tipo Buck-Boost intervalo  $t_{on}$

Transcurrido un intervalo de tiempo, el interruptor se abre como se muestra en la Figura. 2.28. y la energía almacenada previamente en la bobina es transferida al resto del circuito a través del diodo. En este intervalo, la fuente no provee energía al circuito.

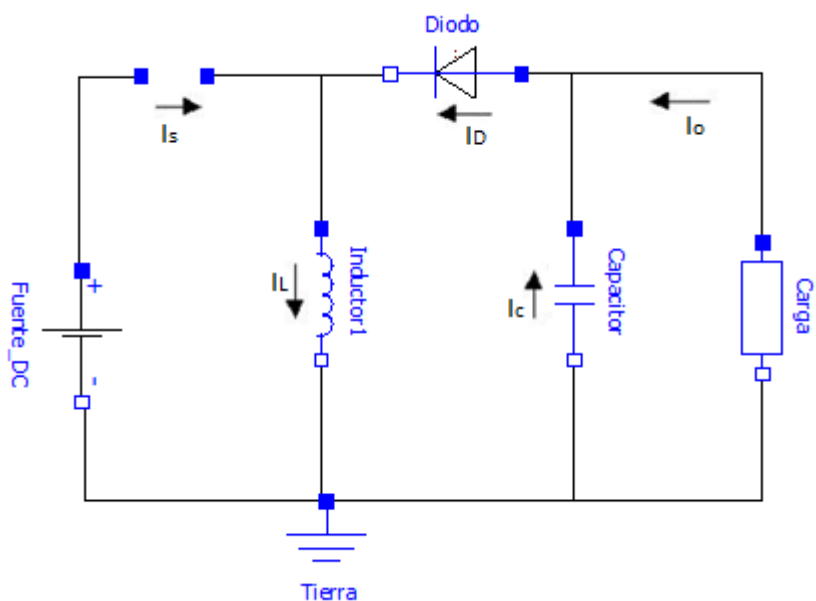


Figura. 2. 28. Convertidor tipo Buck-Boost intervalo  $t_{off}$

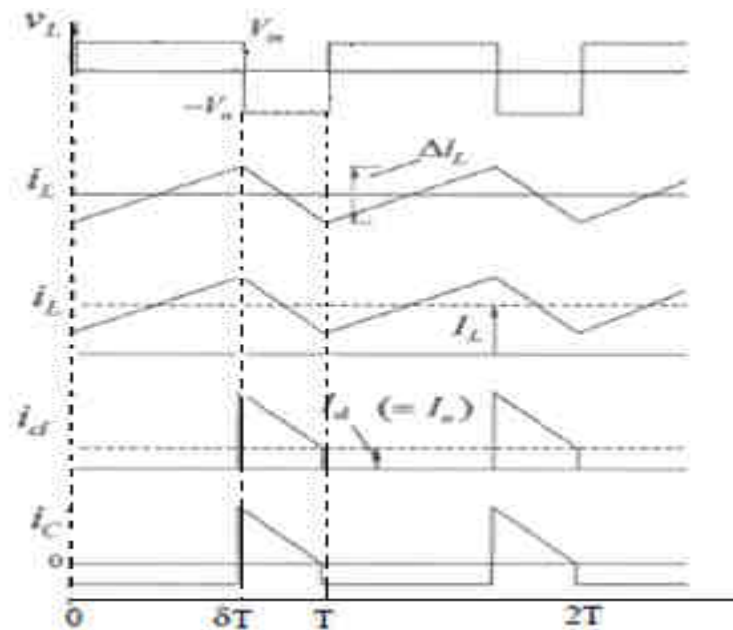


Figura. 2. 29. Formas de onda Convertidor tipo Buck-Boost

Nuevamente se parte de la premisa que el valor medio de voltaje del inductor a lo largo de un periodo debe ser igual a cero como se muestra en la ecuación (2.33).

$$V_i t_{on} + (-V_o) t_{off} = 0 \quad (2.33)$$

Reemplazando las ecuaciones (2.3) y (2.4) en la ecuación (2.33).

$$V_i \delta T - V_o (1 - \delta) T = 0$$

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{\delta}{1 - \delta} \quad (2.34)$$

La relación de voltaje salida con respecto al voltaje de entrada se puede observar en la ecuación (2.34). Ahora bien, para poder definir la relación de intensidad de salida con respecto a la intensidad de entrada se asume que la pérdida de energía es nula, es decir la potencia de entrada será igual a la potencia de salida de esta forma se tiene:



$$\begin{aligned}
 P_i &= P_o \\
 I_i V_i &= I_o V_o \\
 I_i V_i &= I_o \frac{V_i \delta}{1 - \delta} \\
 \frac{I_o}{I_i} &= \frac{1 - \delta}{\delta}
 \end{aligned}
 \tag{2.35}$$

## 2.4 MODELADO MATEMÁTICO DE LOS CONVERTIDORES DC/DC

El modelado matemático de los convertidores permite determinar las ecuaciones diferenciales que los describen. Estas ecuaciones son obtenidas mediante la aplicación de la ley de corrientes y voltajes de kirchoff a cada una de las topologías presentadas. Debido a que se debe considerar la posición del interruptor (estado del transistor), se establece que el valor de  $u=1$  representa al interruptor en posición cerrada y que el valor de  $u=0$  representa al interruptor en posición abierta.

### 2.4.1. Convertidor tipo Buck

Se comenzará por determinar las ecuaciones cuando el interruptor este en la posición cerrada, es decir que el mismo este conduciendo y como se mencionó anteriormente se aplica la ley de voltajes y corrientes de Kirchoff al circuito mostrado en la Figura. 2.6, de esta manera se obtienen las ecuaciones (2.36) y (2.37).

$$L \frac{di_L}{dt} = -V_c + V_i \tag{2.36}$$

$$C \frac{dv_c}{dt} = I_L - \frac{V_c}{R} \tag{2.37}$$

Sin embargo, cuando el interruptor cambia de posición, es decir este se abre, como se puede observar en la Figura. 2.7. se puede describir el sistema de acuerdo a las ecuaciones (2.38) y (2.39).

$$L \frac{di_L}{dt} = -V_c \quad (2.38)$$

$$C \frac{dv_c}{dt} = I_L - \frac{V_c}{R} \quad (2.39)$$

Haciendo uso del valor que se asignó a  $u$  dependiendo la posición en la que se encuentre el interruptor, se puede obtener una expresión para el modelo de convertidor esto es representado en las ecuaciones (2.40) y (2.41).

$$L \frac{di_L}{dt} = -V_c + u(V_i) \quad (2.40)$$

$$C \frac{dv_c}{dt} = I_L - \frac{V_c}{R} \quad (2.41)$$

Ahora bien, para el modo de conducción discontinuo hace falta el modelamiento del convertidor cuando el interruptor está abierto y el diodo no conduce como se muestra en la Figura. 2.9. de este modelo se obtienen las ecuaciones (2.42) y (2.43).

$$L \frac{di_L}{dt} = 0 \quad (2.42)$$

$$C \frac{dv_c}{dt} = -\frac{V_c}{R} \quad (2.43)$$

### 2.4.2. Convertidor tipo Boost

De la misma manera que se trabajó con el convertidor tipo *Buck*, se comenzará por determinar las ecuaciones cuando el interruptor este en la posición cerrada, es decir que el mismo este conduciendo. Este circuito es mostrado en la Figura. 2.13., aplicando las leyes de *Kirchoff* se obtienen las ecuaciones (2.44) y (2.45).

$$L \frac{di_L}{dt} = V_i \quad (2.44)$$

$$C \frac{dv_c}{dt} = -\frac{V_c}{R} \quad (2.45)$$

Sin embargo, cuando el interruptor cambia de posición, es decir este se abre, como se puede observar en la Figura. 2.14. se puede describir el sistema de acuerdo a las ecuaciones (2.46) y (2.47).

$$L \frac{di_L}{dt} = -V_c + V_i \quad (2.46)$$

$$C \frac{dv_c}{dt} = I_L - \frac{V_c}{R} \quad (2.47)$$

Haciendo uso del valor que se asignó a  $u$  dependiendo la posición en la que se encuentre el interruptor, se puede obtener una expresión para el modelo de convertidor éste es representado en las ecuaciones (2.48). y (2.49).

$$L \frac{di_L}{dt} = -(1-u)V_c + V_i \quad (2.48)$$

$$C \frac{dv_c}{dt} = (1-u)(I_L) - \frac{V_c}{R} \quad (2.49)$$

Ahora bien, para el modo de conducción discontinuo hace falta el modelamiento del convertidor cuando el interruptor está abierto y el diodo no conduce como se muestra en la Figura. 2.16. de este modelo se obtienen las ecuaciones (2.50) y (2.51).

$$L \frac{di_L}{dt} = 0 \quad (2.50)$$

$$C \frac{dv_c}{dt} = -\frac{V_c}{R} \quad (2.51)$$

### 2.4.3. Convertidor tipo Sepic

De la misma manera, se comenzará por determinar las ecuaciones cuando el interruptor este en la posición cerrada, es decir que el mismo este conduciendo.

Este circuito es mostrado en la Figura. 2.20., aplicando las leyes de *Kirchoff* se obtienen las ecuaciones (2.52), (2.53), (2.54) y (2.55).

$$L1 \frac{di_{L1}}{dt} = Vi \quad (2.52)$$

$$L2 \frac{di_{L2}}{dt} = V_{C1} \quad (2.53)$$

$$C1 \frac{dv_{c1}}{dt} = -I_{L2} \quad (2.54)$$

$$C2 \frac{dv_{c2}}{dt} = -\frac{V_{C2}}{R} \quad (2.55)$$

Sin embargo, cuando el interruptor cambia de posición, es decir éste se abre, como se observa en la Figura. 2.21. se puede describir el sistema de acuerdo a las ecuaciones (2.56), (2.57), (2.58) y (2.59).

$$L1 \frac{di_{L1}}{dt} = -V_{C2} - V_{C1} + Vi \quad (2.56)$$

$$L2 \frac{di_{L2}}{dt} = -V_{C2} \quad (2.57)$$

$$C1 \frac{dv_{c1}}{dt} = I_{L1} \quad (2.58)$$

$$C2 \frac{dv_{c2}}{dt} = -\frac{V_{C2}}{R} + I_{L2} + I_{L1} \quad (2.59)$$

Haciendo uso del valor que se asignó a  $u$  dependiendo la posición en la que se encuentre el interruptor, se puede obtener una expresión para el modelo de convertidor, esto es representado en las ecuaciones (2.60), (2.61), (2.62) y (2.63).

$$L1 \frac{di_{L1}}{dt} = -(1-u)(V_{C2} + V_{C1}) + Vi \quad (2.60)$$

$$L2 \frac{di_{L2}}{dt} = uV_{C1} - (1-u)V_{C2} \quad (2.61)$$

$$C1 \frac{dv_{c1}}{dt} = (1-u)I_{L1} - uI_{L2} \quad (2.62)$$

$$C2 \frac{dv_{c2}}{dt} = -\frac{V_{C2}}{R} + (1-u)(I_{L2} + I_{L1}) \quad (2.63)$$

Ahora bien, para el modo de conducción discontinuo hace falta el modelamiento del convertidor cuando el interruptor está abierto y el diodo no conduce como se muestra en la Figura. 2.30. de este modelo se obtienen las ecuaciones (2.64), (2.65), (2.66) y (2.67).

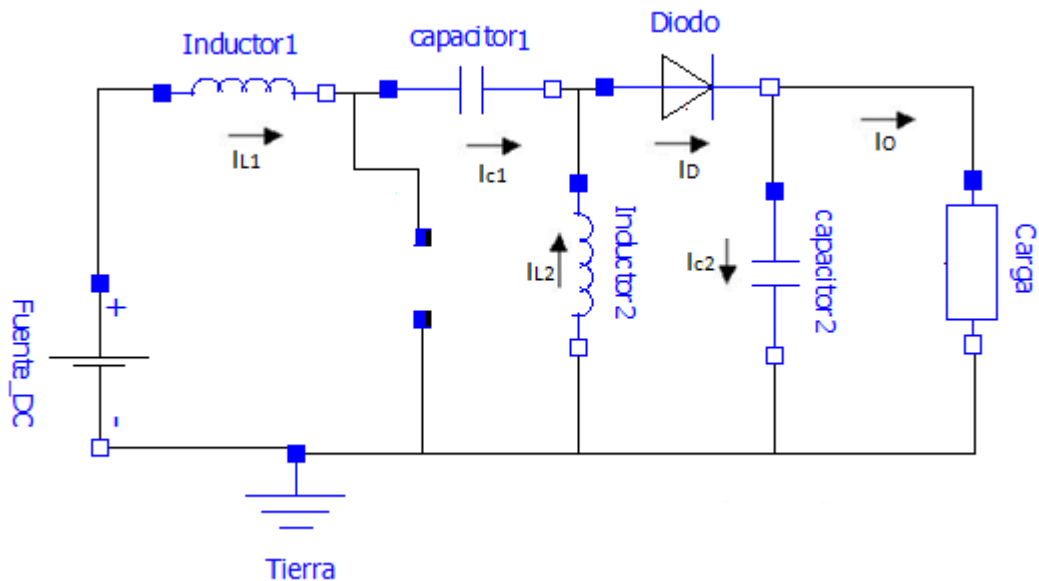


Figura. 2. 30. Convertidor Tipo Sepic intervalo toff modo de conducción Discontinua

$$\frac{di_{L1}}{dt} = -\frac{V_{C1}}{L1 + L2} + \frac{Vi}{L1 + L2} \quad (2.64)$$

$$\frac{di_{L2}}{dt} = \frac{V_{C1}}{L1 + L2} - \frac{Vi}{L1 + L2} \quad (2.65)$$

$$C1 \frac{dv_{c1}}{dt} = -I_{L2} + I_{L1} \quad (2.66)$$

$$C2 \frac{dv_{c2}}{dt} = -\frac{V_{C2}}{R} \quad (2.67)$$

#### 2.4.4. Convertidor tipo Cuk

Se determinará inicialmente las ecuaciones cuando el interruptor este en la posición cerrada, es decir que el mismo este conduciendo. Este circuito es mostrado en la Figura. 2.23., aplicando las leyes de *Kirchoff* se obtienen las ecuaciones (2.68), (2.69), (2.70) y (2.71)

$$L1 \frac{di_{L1}}{dt} = Vi \quad (2.68)$$

$$L2 \frac{di_{L2}}{dt} = -V_{C2} - V_{C1} \quad (2.69)$$

$$C1 \frac{dv_{C1}}{dt} = I_{L2} \quad (2.70)$$

$$C2 \frac{dv_{C2}}{dt} = -\frac{V_{C2}}{R} + I_{L2} \quad (2.71)$$

Sin embargo, cuando el interruptor cambia de posición, es decir éste se abre, como se puede observar en la Figura. 2.24. se puede describir el sistema de acuerdo a las ecuaciones (2.72), (2.73), (2.74) y (2.75).

$$L1 \frac{di_{L1}}{dt} = -V_{C1} + Vi \quad (2.72)$$

$$L2 \frac{di_{L2}}{dt} = -V_{C2} \quad (2.73)$$

$$C1 \frac{dv_{C1}}{dt} = I_{L1} \quad (2.74)$$

$$C2 \frac{dv_{C2}}{dt} = -\frac{V_{C2}}{R} + I_{L2} \quad (2.75)$$

Haciendo uso del valor que se asigno a  $u$  dependiendo la posición en la que se encuentre el interruptor, se puede obtener una expresión para el modelo de convertidor, esto es representado en la ecuaciones (2.76), (2.77), (2.78) y (2.79).

$$L1 \frac{di_{L1}}{dt} = -(1-u)V_{C1} + Vi \quad (2.76)$$

$$L2 \frac{di_{L2}}{dt} = -uV_{C1} - V_{C2} \quad (2.77)$$

$$C1 \frac{dv_{C1}}{dt} = (1 - u)I_{L1} + uI_{L2} \quad (2.78)$$

$$C2 \frac{dv_{C2}}{dt} = -\frac{V_{C2}}{R} + I_{L2} \quad (2.79)$$

Ahora bien, para el modo de conducción discontinuo hace falta el modelamiento del convertidor cuando el interruptor está abierto y el diodo no conduce como se muestra en la Figura. 2.31. de este modelo se obtienen las ecuaciones (2.80), (2.81), (2.82) y (2.83).

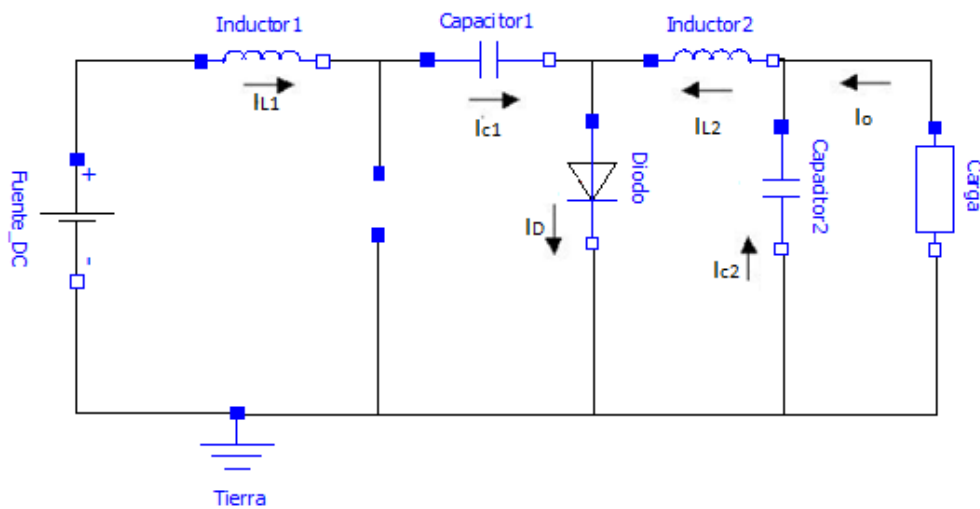


Figura. 2. 31. Convertidor Tipo Cuk intervalo toff modo de conducción discontinuo

$$\frac{di_{L1}}{dt} = -\frac{2V_{C1}}{L1 + L2} + \frac{Vi}{L1 + L2} \quad (2.80)$$

$$\frac{di_{L2}}{dt} = \frac{2V_{C1}}{L1 + L2} - \frac{Vi}{L1 + L2} \quad (2.81)$$

$$C1 \frac{dv_{C1}}{dt} = I_{L1} \quad (2.82)$$

$$C2 \frac{dv_{C2}}{dt} = -\frac{V_{C2}}{R} + I_{L1} \quad (2.83)$$

### 2.4.5. Convertidor tipo Buck-Boost

Se procede a determinar las ecuaciones cuando el interruptor este en la posición cerrada, es decir que el mismo este conduciendo. Este circuito es mostrado en la Figura. 2.27., aplicando las leyes de *Kirchoff* se obtienen las ecuaciones (2.84). y (2.85).

$$L \frac{di_L}{dt} = Vi \quad (2.84)$$

$$C \frac{dv_c}{dt} = -\frac{Vc}{R} \quad (2.85)$$

Sin embargo, cuando el interruptor cambia de posición, es decir éste se abre, como se puede observar en la Figura. 2.28. se puede describir el sistema de acuerdo a las ecuaciones (2.86). y (2.87).

$$L \frac{di_L}{dt} = Vc \quad (2.86)$$

$$C \frac{dv_c}{dt} = -I_L - \frac{Vc}{R} \quad (2.87)$$

Haciendo uso del valor que se asigno a  $u$  dependiendo la posición en la que se encuentre el interruptor, se puede obtener una expresión para el modelo de convertidor, esto es representado en las ecuaciones (2.88) y (2.89).

$$L \frac{di_L}{dt} = (1 - u)Vc + uVi \quad (2.88)$$

$$C \frac{dv_c}{dt} = -(1 - u)(I_L) - \frac{Vc}{R} \quad (2.89)$$

Ahora bien, para el modo de conducción discontinuo hace falta el modelamiento del convertidor cuando el interruptor está abierto y el diodo no conduce como se muestra en la Figura. 2.32. de este modelo se obtienen las ecuaciones (2.90) y (2.91).

$$L \frac{di_L}{dt} = 0 \quad (2.90)$$



$$C \frac{dv_c}{dt} = -\frac{V_c}{R} \quad (2.91)$$

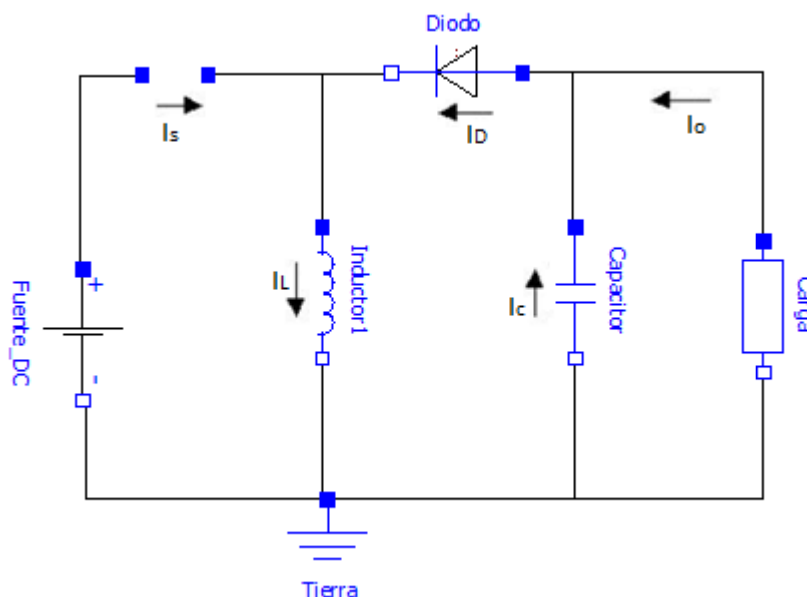


Figura. 2. 32. Convertidor Tipo Buck-Boost intervalo toff modo de conducción discontinuo

## 2.5 GENERALIDADES DEL SIMULADOR OPENMODELICA

Modelica un lenguaje de modelado y su nombre es una marca registrada de la “Modelica Association” que es la responsable de la publicación de la especificación del lenguaje<sup>12</sup>.

Modelica es así, un lenguaje de simulación y modelaje orientado a objetos. Permite el modelamiento de sistemas eléctricos, mecánicos, hidráulicos, sistemas de control, así como el modelamiento de aplicaciones orientadas a procesos y sistemas dinámicos.

El lenguaje modélica fue diseñado de manera que pueda ser utilizado en forma similar a como un ingeniero construye un sistema real, es decir con el uso de ecuaciones. Un ejemplo básico de esta aseveración se muestra a continuación. Teniendo como punto de partida la ecuación de la derivada de  $x$  y el valor inicial de la misma (Ecuaciones (2.92) y (2.93)) se puede instanciar esta ecuación en un editor de Modelica.

<sup>12</sup> [http://pels.edv.uniovi.es/pels/pels/Pdf/Tesis/Tesis\\_Jesus\\_Oliver.pdf](http://pels.edv.uniovi.es/pels/pels/Pdf/Tesis/Tesis_Jesus_Oliver.pdf)

$$\dot{x} = -x \quad (2.92)$$

$$x(0) = 1 \quad (2.93)$$

En la Figura. 2.33. se muestra como las ecuaciones (2.92) y (2.93) son instanciadas en lenguaje modélica y claramente se puede observar la similitud que existe entre el modelo matemático y el lenguaje de programación utilizado. De igual forma, se puede apreciar la gráfica obtenida después de la simulación del modelo creado, esta gráfica constituye la representación de la variable  $x$ .

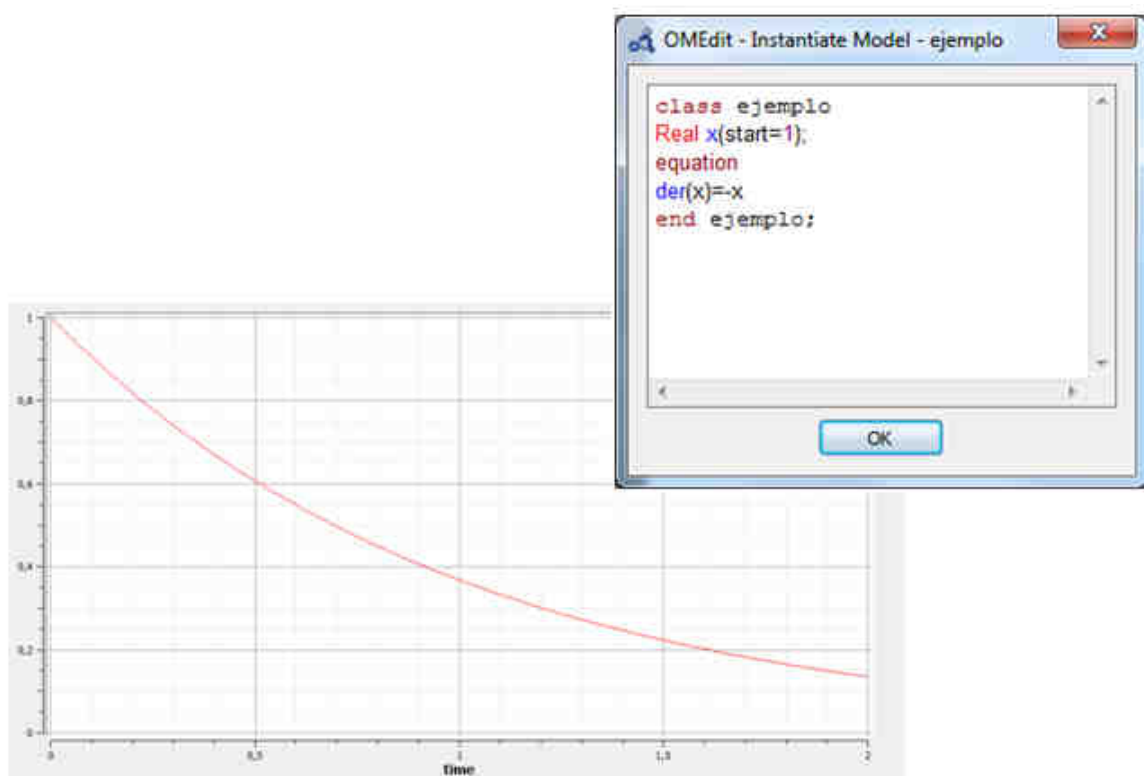


Figura. 2. 33. Ejemplo Lenguaje Modelica

- **Principios del modelamiento basado en ecuaciones**

Cada icono representa un componente físico: por ejemplo una resistencia, bomba, motor, etc.

Las líneas de unión representan las conexiones físicas reales como líneas eléctricas, conexiones mecánicas, etc.

Las variables en las interfaces describen la interacción con otros componentes.

El comportamiento físico de un componente es descrito por ecuaciones

Existen varios ambientes para trabajar con lenguaje Modelica. Los ambientes de simulación comerciales y gratuitos se muestran a continuación:

- Dynasim de Dynasim AB (Suiza)
- MathModelica de MathCore (Suiza)
- SimulationX de Alemania
- MapleSIM de Canada
- OpenModelica de Universidad LinKoping (Suiza)
- SCICOS de INRIA (Francia)

Para la simulación de los modelos necesarios se utilizará el simulador OpenModelica el cual es un software de acceso libre, la creación de los modelos se realizará utilizando el editor de conexiones del simulador.

Openmodelica puede ser utilizado bajo los sistemas operativos de Windows, Linux o OSX, y debido a que es un software de acceso libre se lo puede descargar gratuitamente desde la página web de la asociación modélica.

- **OMEdit**

*OpenModelica Connection Editor*. El editor de conexiones de Openmodelica es la interface gráfica de usuario para la edición de modelos de forma gráfica en openmodelica. El editor ha sido implementado en lenguaje C++ usando la librería de interface gráfica, además soporta la librería estándar de Modélica.

Una vez que se abra el editor deberá aparecer una pantalla como la que se muestra en la Figura. 2.34. Es la pantalla principal del editor de conexiones, en la parte superior de la misma se puede observar la barra de menú, así como la barra de herramientas que permite acceder a funciones rápidamente. En la parte izquierda, se observa la librería estándar de modélica con herramientas para simular modelos eléctricos, hidráulicos, mecánicos, entre otros. En la parte inferior

se observa la información para errores y advertencias que puedan presentarse durante la creación del modelo o la ejecución de la simulación del mismo. Finalmente, en la parte derecha se observa las herramientas de simulación, son botones que permiten el acceso fácil a las simulaciones y al modelo.

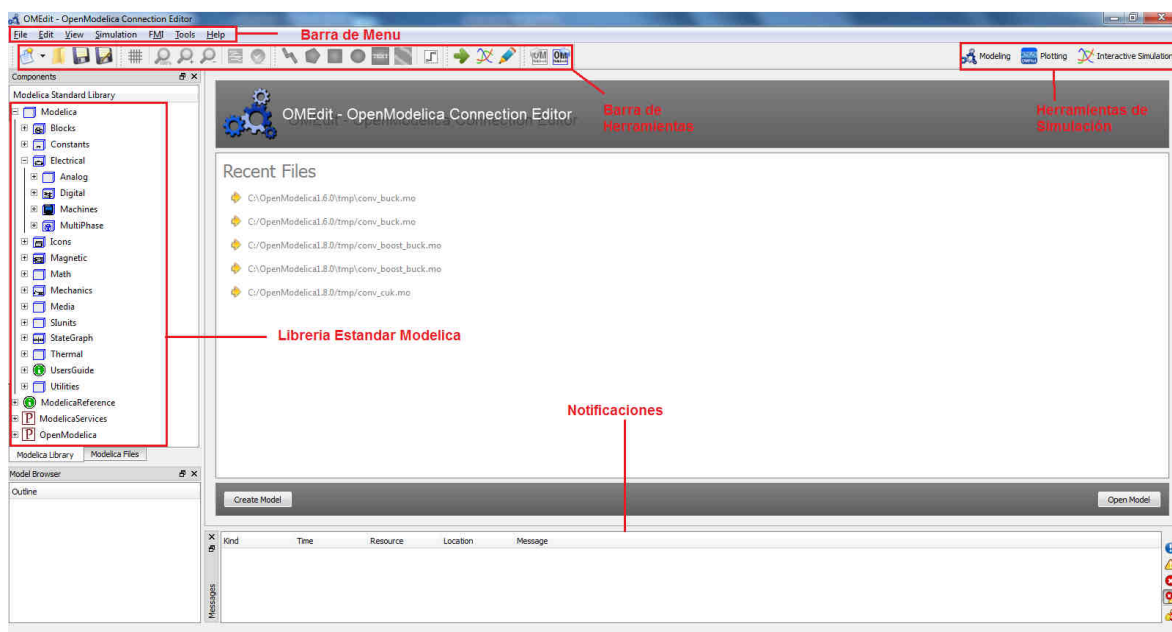


Figura. 2. 34. Pantalla OMEdit Simulador Openmodelica

Para crear un nuevo modelo, basta únicamente con seleccionar la opción nuevo modelo que se encuentra dentro del menú *File*. Aparecerá una ventana en la cual se debe colocar el nombre que se desea para el modelo e inmediatamente aparecerá la ventana de trabajo.

El simulador es muy sencillo en su forma de manejar, como la mayoría de simuladores, éste permite arrastrar los elementos para colocarlos en el área de trabajo e ir formando los modelos o circuitos deseados. Los elementos disponibles para trabajar en este simulador pueden ser encontrados en las librerías existentes, para hacer uso de estos basta únicamente con navegar dentro de la librería y seleccionar el elemento deseado, como fue mencionado, el simulador presenta tanto herramientas eléctricas, mecánicas como hidráulicas. Una vez seleccionado un elemento, se lo debe arrastrar hasta el área de trabajo, y de esa manera se colocan tantos elementos como sean necesarios.

Para editar las propiedades de los componentes a ser utilizados, es decir los elementos que se encuentran sobre el área de trabajo, será necesario simplemente dar *click* derecho sobre el elemento y seleccionar la opción propiedades, con esto se desplegará una ventana que presente los parámetros que pueden ser modificados dentro del elemento.

Una vez que se tengan los elementos necesarios para trabajar lo único que resta para completar el modelo es la conexión de los mismo para lo cual es necesario activar el botón *Connect/Unconnect* que se encuentra en la barra de herramientas (Figura. 2.35.) enseguida se debe dar *click* sobre uno de los puertos de un componente y llevar la línea de conexión hasta uno de los puertos de otro componente.



**Figura. 2. 35. Botón Connect/Unconnect**

Para simular el modelo, se puede seleccionar la opción simular desde el menú simulación o es posible también, seleccionar el botón de simulación en la barra de herramientas. Deberá aparecer una ventana para configurar las opciones de simulación como se muestra en la Figura. 2.36, en dicha ventana se debe seleccionar los parámetros de simulación, tanto tiempo de inicio como tiempo de finalización de la simulación, método utilizado para simular el circuito, tolerancia deseada, intervalos requeridos, etc. Una vez determinados los parámetros deseados para la simulación se procede a realizar la misma.

Al finalizar la simulación, aparecerán las gráficas obtenidas de la misma y en el lado derecho de la ventana, se mostrará un árbol de navegación que permite seleccionar los parámetros que se desean observar en las gráficas.

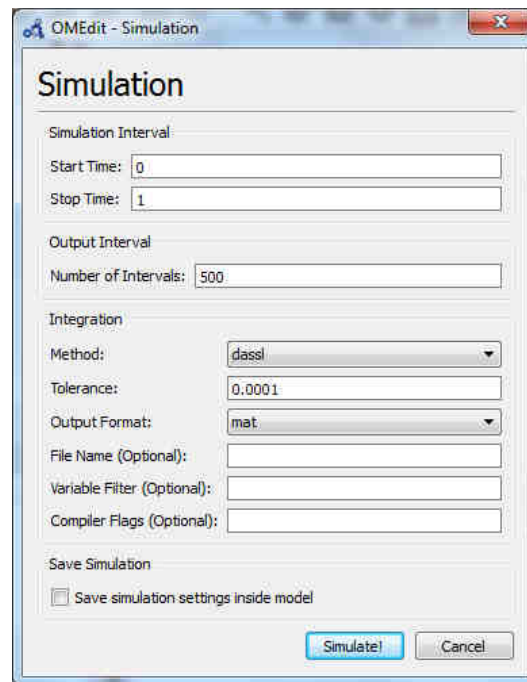


Figura. 2. 36. Ventana propiedades de Simulación OpenModelica

Es posible acceder a la información de cada uno de los componentes de la librería al dar *click* derecho sobre el componente y seleccionar la opción ver documentación (Figura. 2.37). Al realizar esta acción aparecerá en la parte derecha de la ventana la información que se tiene sobre el componente seleccionado.

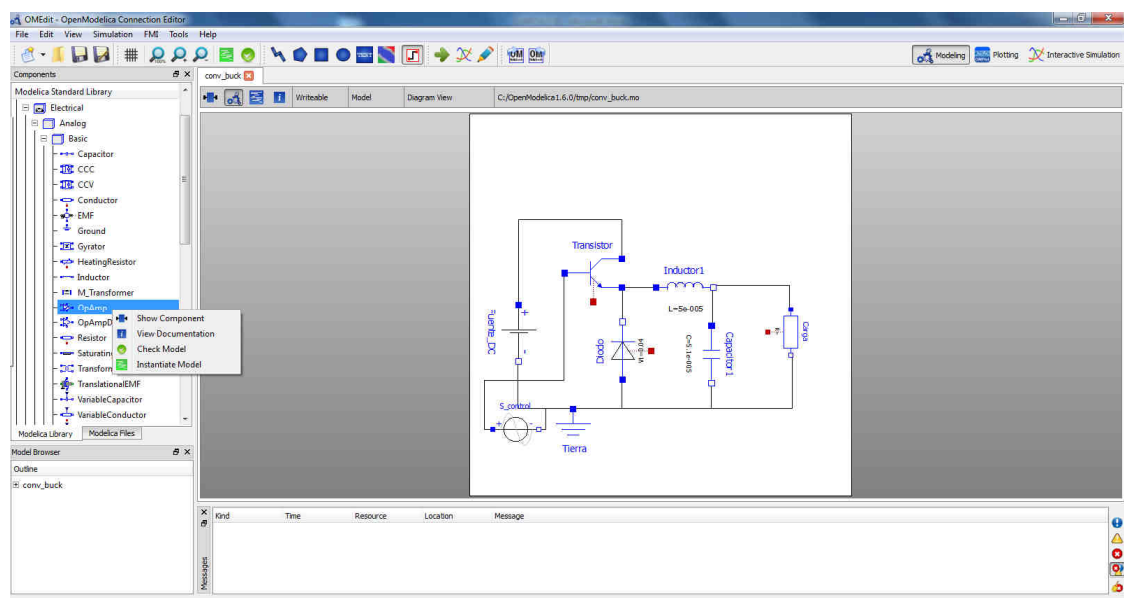


Figura. 2. 37. Menú para ver detalles del Elemento

Además, *OMEdit* ofrece la posibilidad de crear figuras definidas dentro de un modelo instanciado, estas figuras pueden ser rectángulos, elipses, polígonos, líneas. Así también se puede insertar texto o alguna imagen que definida como *bitmap*. Para hacer uso de estas opciones, se accede a ellas desde la barra de herramientas de la ventana.

## 2.6 GENERALIDADES DE SCILAB

Scilab es un *software* desarrollado en el instituto francés INRIA *Institut National de Recherche en Informatique et Automatique*, con la colaboración de la escuela de ingenieros ENPC, *Ecole Nationale de Ponts et Chaussées*. Sus principales características son:

- Software para cálculo científico
- Interactivo
- De libre uso
- Disponible para diferentes plataformas: Windows, Linux, OSX

Scilab permite compilar y utilizar otros lenguajes como Fortran y C, de esta forma librerías externas pueden ser utilizadas como si fuesen parte de Scilab. Este software es compatible con Matlab por lo que cualquier archivo de matlab M-File, puede ser simulado directamente desde Scilab.

En la Figura. 2.38. se puede observar la pantalla principal de Scilab. Es posible escribir los comandos desde esta pantalla o existe la posibilidad de crear un archivo ejecutable que contenga todos los comandos necesarios que se deseen simular.

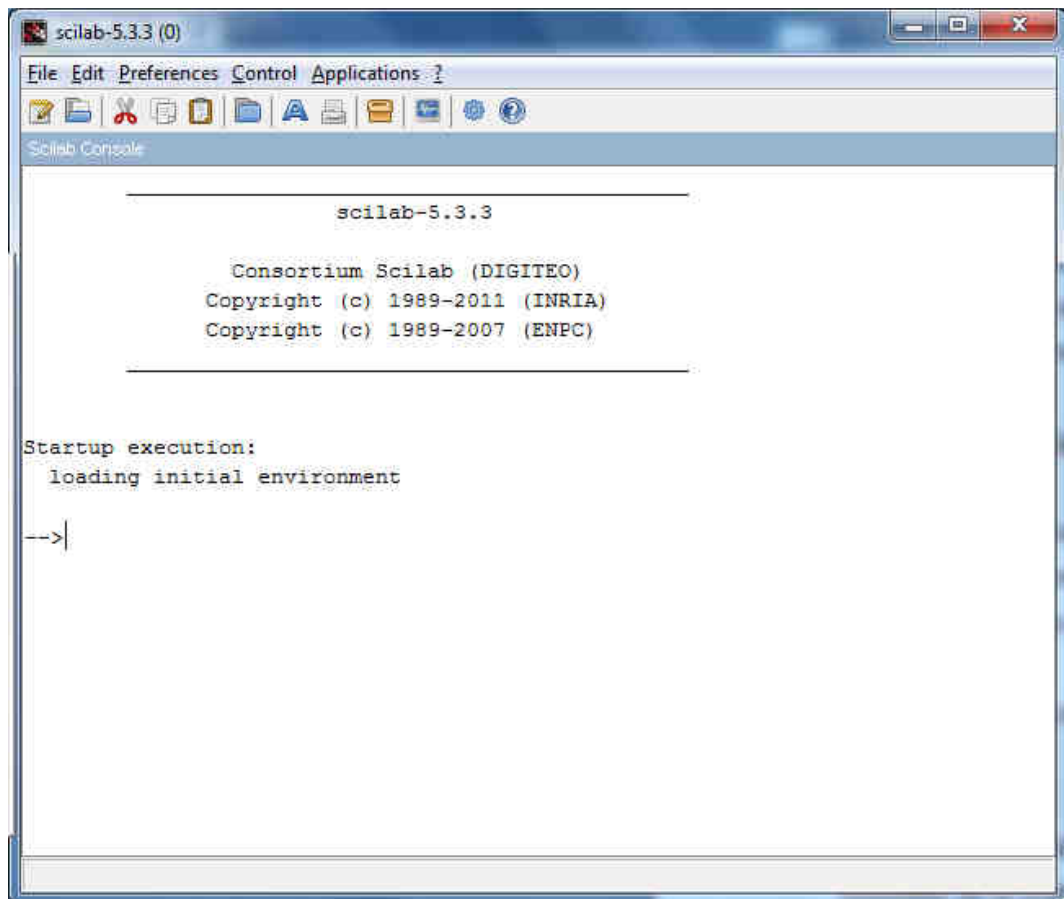


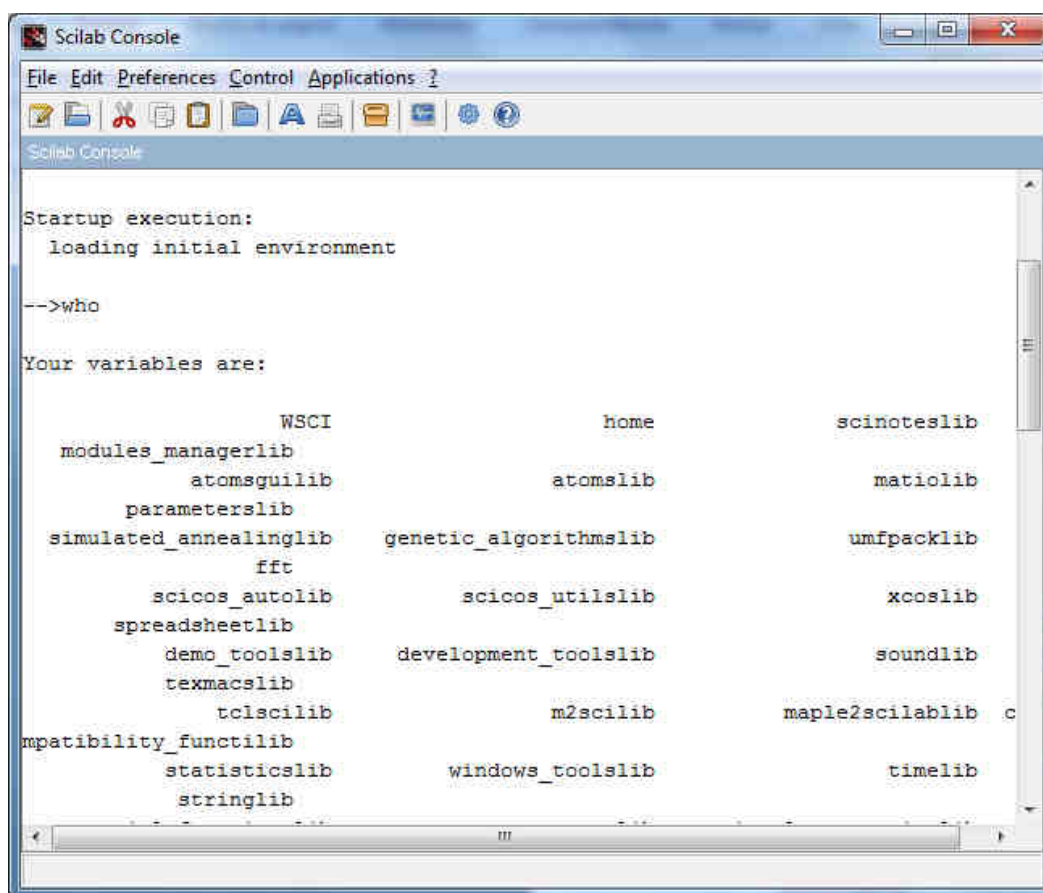
Figura. 2. 38. Pantalla Principal Scilab

Para crear una variable se necesita únicamente asignarle un valor utilizando el signo de igual. Para lograr que una instrucción se ejecute evitando que el resultado de una operación se muestre en la pantalla, basta con incluir punto y coma al final de la instrucción. Si se quiere conocer el valor de una variable ya definida, basta con digitar el nombre de la variable y oprimir *Enter*.

Un punto importante que se debe tener en cuenta es que Scilab diferencia las letras minúsculas de las mayúsculas. Además, los números se pueden escribir utilizando la notación usual o la notación científica. Por ejemplo, es posible escribir estos números: 3.5, -4.1234, 3.14e-10, 0.0023e20

Para poder observar las variables que están siendo utilizadas al momento se utiliza el comando *who*, se obtiene de esta manera una respuesta similar a la mostrada en la Figura.2.39. Este comando muestra además las variables propias de Scilab.





```

Scilab Console
File Edit Preferences Control Applications ?
Startup execution:
  loading initial environment

-->who

Your variables are:

      WSCI      home      scinoteslib
modules_managerlib
  atomsguilib      atomslib      matiolib
  parameterslib
simulated_annealinglib  genetic_algorithmslib      umfpacklib
      fft
  scicos_autolib      scicos_utilslib      xcplib
  spreadsheetlib
  demo_toolslib      development_toolslib      soundlib
  texmacslib
  tciscilib      m2scilib      maple2scilablib
compatibility_funcilib
  statisticslib      windows_toolslib      timelib
  stringlib

```

**Figura. 2. 39. Comando "who" Scilab**

Los nombres de las variables utilizadas en Scilab pueden contener hasta 24 caracteres, siendo el primero una letra o \$, los otros pueden ser letras o números o signos como #, \_, !.

Cuando en la orden no hay ninguna asignación, sino simplemente una operación válida, Scilab crea o actualiza una variable llamada *ans* en la que será almacenado el resultado.

Es posible repetir una orden dada anteriormente a utilizando las teclas correspondientes a las flechas hacia arriba y hacia abajo. También es posible, por medio de las flechas (hacia arriba y hacia abajo), buscar una orden anterior para editarla y enseguida activarla.

En una misma línea de Scilab puede haber varias órdenes. Éstas deben estar separadas por coma o por punto y coma.

Los símbolos (+ - \* /) sirven para las 4 operaciones aritméticas. El signo - también sirve para indicar el inverso aditivo. Para elevar a una potencia se utiliza el signo ^ o también \*\*.

En una expresión puede haber varios operadores. Las reglas de precedencia son semejantes a las de la escritura matemática usual. Los paréntesis tienen prioridad sobre todos los operadores. Entre operadores de igual prioridad, se utiliza el orden de izquierda a derecha.

Scilab tiene predefinidas muchas funciones matemáticas. Estas son mostradas en la Tabla. 2.1.

Función	Descripción
abs	Valor absoluto
acosh	Arcocoseno hiperbólico
asinh	Arcoseno hiperbólico
atanh	Arcotangente hiperbólica
cos	Coseno
cotg	Cotangente
exp	Función exponencial: ex
floor	Parte entera inferior
log	Logaritmo natural
log2	Logaritmo en base dos
min	Mínimo
rand	Número aleatorio
sin	Seno
sqrt	Raíz cuadrada
tanh	Tangente hiperbólica

Función	Descripción
acos	Arcocoseno
asin	Arcoseno
atan	Arcotangente
ceil	Parte entera superior
cosh	Coseno hiperbólico
coth	Cotangente hiperbólica
fix	Redondeo hacia cero
int	Redondeo hacia cero
log10	Logaritmo decimal
max	Máximo
modulo	Residuo entero
round	Redondeo
sinh	Seno hiperbólico
tan	Tangente

Tabla. 2. 1. Funciones Básicas de Scilab

Para tener información más detallada sobre alguna función basta con digitar *help* seguido del nombre de la función o de la orden. Obviamente se requiere que la función exista. Si no se conoce el nombre de la función, pero se desea buscar sobre un tema, se debe utilizar el comando *apropos* en lugar de *help*, de esta

manera se logra obtener información sobre funciones que tienen que ver con el tema requerido.

Scilab tiene muchas más funciones como las funciones y mediante la barra de menú, con la opción *Help* seguida de *Help Dialog* se obtiene un catálogo resumido de las herramientas de Scilab.

Se puede modificar el formato utilizado por Scilab para mostrar los resultados, mediante *format*. Por ejemplo, si se da la orden *format(16)*, Scilab utilizará 16 “columnas” (16 posiciones) para mostrar cada número, estas posiciones incluyen el espacio para el signo la parte entera y el punto. Por defecto, Scilab usa 10 posiciones.

De crear un archivo ejecutable con los comandos, para ponerlo a trabajar basta con seleccionar la opción *Execute* del menú archivo y seleccionar el archivo deseado.

## **CAPITULO III**

### **ANALISIS DE CONVERTORES DC-DC**

Si bien el propósito de éste documento es realizar un análisis de los convertidores DC-DC utilizando el simulador OpenModelica, en éste capítulo se muestran los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas utilizando el *software* Scilab y OpenModelica. Además, en el punto 3.3 se presenta un modelo optimizado de una de las topologías analizadas, para éste modelo propuesto se muestran las simulaciones realizadas así como su respectivo análisis.

En primer lugar se presentan los resultados obtenidos mediante el uso del simulador Scilab. Además en el punto 3.2 se presenta los resultados obtenidos mediante el simulador OpenModelica. Se optó por trabajar en el OMS (OpenModelica Shell) ventana de comandos de OpenModelica ya que al simular los circuitos en el ambiente grafico del mismo presenta algunos errores.

#### **3.1. SIMULACIONES DE CONVERTORES CON SCILAB**

Las simulaciones son realizadas utilizando el *software* Scilab, por lo cual se hace uso del modelo matemático de las diferentes topologías de convertidores dc-dc que fue presentado en el capítulo anterior de este documento.

Para realizar las simulaciones de las diferentes topologías de convertidores es necesario en primer lugar calcular el valor de los elementos de los circuitos, las ecuaciones utilizadas para este fin se muestran a continuación.

Para calcular el valor del inductor y capacitor en un convertor de topología *buck* se utiliza las ecuaciones (3.1) y (3.2) respectivamente. Mientras que para el cálculo de los valores de los elementos del convertor en topología *boost* o *buck-boost* se utiliza las ecuaciones (3.3) y (3.4) de forma respectiva.

$$L = \frac{V_i(1 - \delta)\delta}{f\Delta i} \quad (3.1)$$

$$C = \frac{V_i(1 - \delta)\delta}{8f^2L\Delta V_c} \quad (3.2)$$

$$L = \frac{V_o(1 - \delta)\delta}{f\Delta i} = \frac{\delta V_i}{f\Delta i} \quad (3.3)$$

$$C = \frac{\delta I_o}{f\Delta V_c} \quad (3.4)$$

Donde:

$V_i$ : Voltaje de entrada al convertor

$f$ : Frecuencia de conmutación del semiconductor

$\delta$ : ciclo de trabajo  $<1$

$V_o$ : Voltaje de salida del convertor

$\Delta V_c$ : Rizado de la tensión de salida

$\Delta i$ : Rizado de la Corriente en el inductor

$I_o$ : Corriente entregada a la carga

Las respuestas obtenidas gracias a las simulaciones son: la corriente obtenida en el inductor del circuito y el voltaje de salida obtenido, para cada una de las topologías de los convertidores DC-DC.

Las frecuencias de conmutación de los convertidores se encuentran en el rango de 20 KHz hasta 1 MHz. Aunque el uso de frecuencias es por debajo de

100KHz, presenta baja eficiencia, mientras que las frecuencias más altas permiten reducir las inductancias y los condensadores en tamaño y valor<sup>13</sup>.

Para el análisis de los convertidores detallados en el capítulo anterior se ha optado por trabajar en una frecuencia de 20KHz.

Para el análisis de los distintos convertidores se trabaja con una carga puramente resistiva, para determinar el valor de dicha resistencia se hace uso de las corrientes y voltajes de salida requeridos.

### 3.1.1. Simulación Conversor Tipo *Buck*

Los parámetros iniciales para el circuito del conversor *Buck* son:

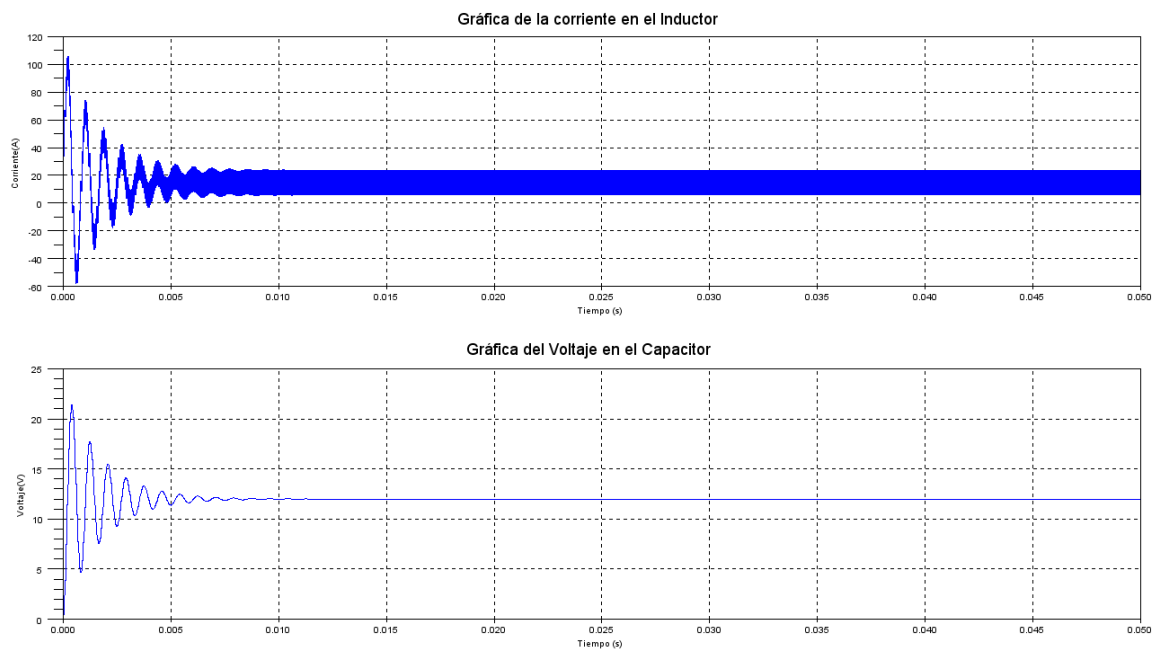
- Tensión de Entrada: 24 V
- Tensión de salida: 12 V
- Frecuencia de Trabajo: 20 KHz
- Corriente de Salida: 11 A
- Rizado de Tensión de salida 1%

Se utiliza la ecuación (3.1) y (3.2) para el cálculo del inductor y del capacitor, teniendo un valor de  $0.1688mH$  para el inductor y  $1.04 mF$  para el valor del capacitor.

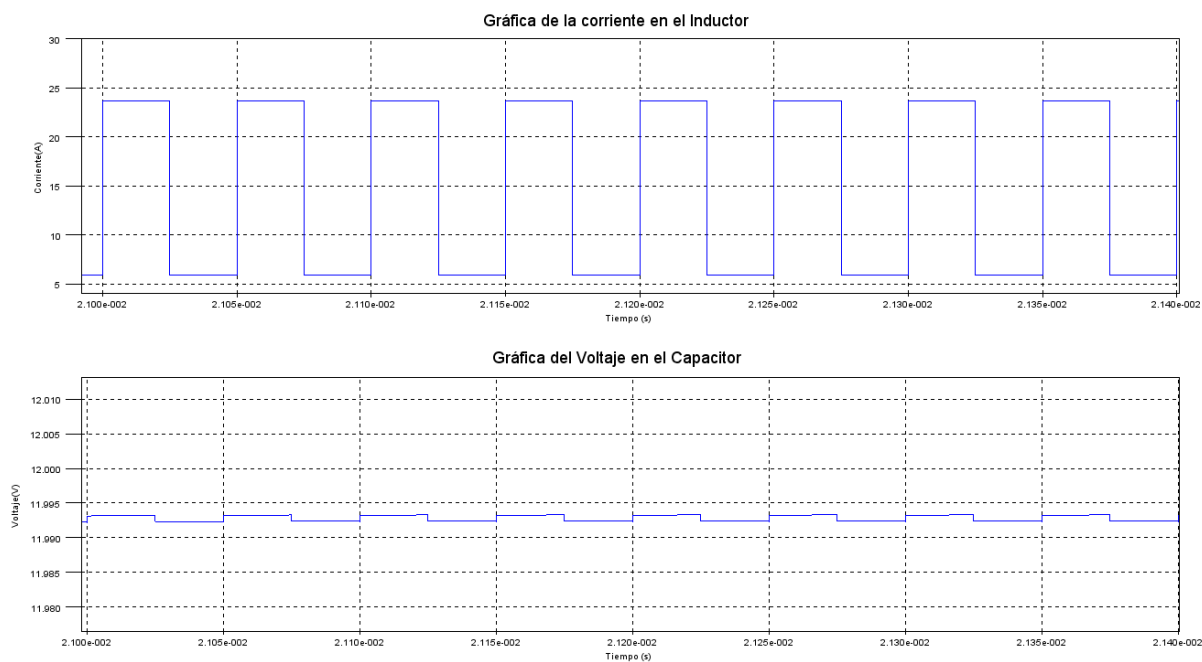
Como se mencionó anteriormente para la simulación del conversor en *Scilab* se hace uso del modelo matemático del mismo. La definición del modelo matemático así como el código del programa principal utilizado para la simulación de este conversor se encuentra en el Anexo 1.

---

<sup>13</sup> Ariza T, Miguel., Luna C, Ivan, [h](http://www.laccei.org/LACCEI2007-Mexico/Papers%20PDF/ED190_ArizaT.pdf)"Diseño e Implementación de un sistemas de alimentación eficiente y robusto para suministro de energía de un Picosatelite tipo cubesat", [ttp://www.laccei.org/LACCEI2007-Mexico/Papers%20PDF/ED190\\_ArizaT.pdf](http://www.laccei.org/LACCEI2007-Mexico/Papers%20PDF/ED190_ArizaT.pdf)



**Figura. 3. 1. Respuesta Conversor Tipo Buck  $\delta=0.5$**



**Figura. 3. 2. Respuesta Conversor Tipo Buck  $\delta=0.5$  (Señal Ampliada)**

En la Figura. 3.2 se puede observar que la corriente obtenida en el inductor tiene un valor medio aproximado de 11 A. Por otro lado, en la Figura. 3.1. se puede observar que la corriente tiene un pico demasiado alto, sobrepasando los

100A durante su estado transitorio, ésta varía entre valores positivos y negativos de corriente antes de estabilizarse como se espera. A pesar de obtener este valor alto en la simulación, en la realidad no es posible obtener un valor tan alto como 100A como respuesta.

De la misma manera, es posible observar que la señal de salida presenta varios sobreimpulsos antes de estabilizarse, estos sobreimpulsos sin embargo, no sobrepasan el valor del voltaje de entrada al circuito. En la Figura. 3.2 se puede observar que el rizado obtenido a la salida es insignificante, debido a que se especificó que el valor de rizado deseado como 1%.

### 3.1.2. Simulación Conversor Tipo *Boost*

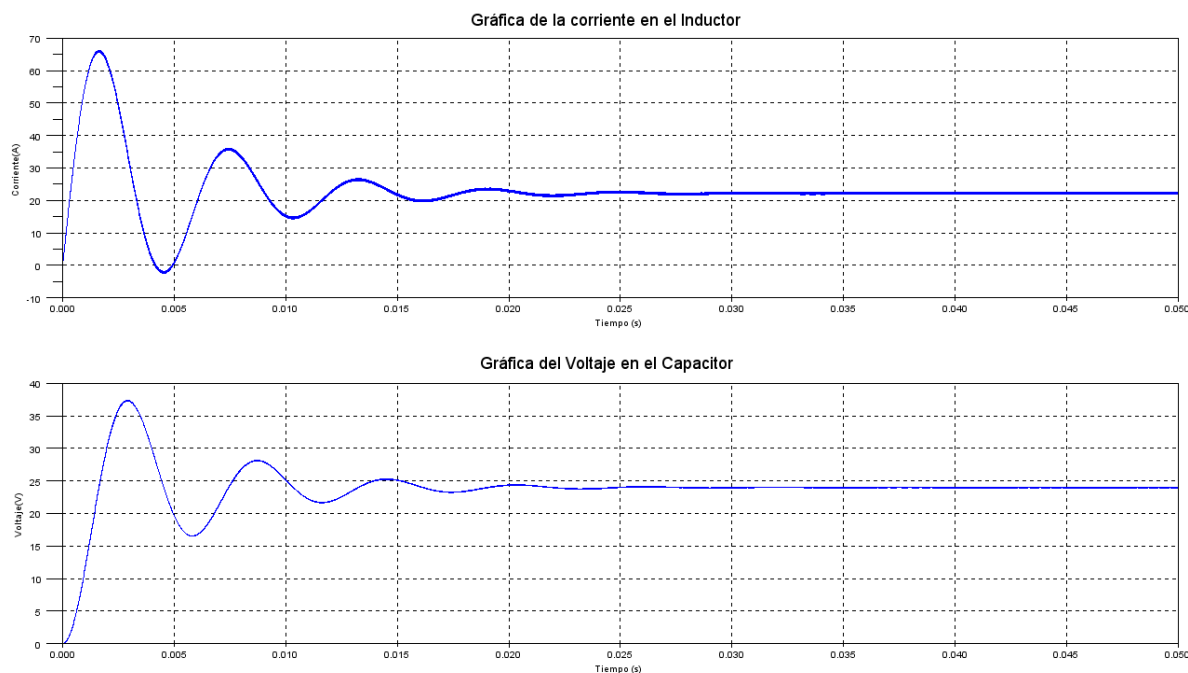
Los parámetros iniciales para el circuito del conversor *Boost* son:

- Tensión de Entrada: 12 V
- Tensión de salida: 24 V
- Frecuencia de Trabajo: 20 KHz
- Corriente de Salida: 11 A
- Rizado de Tensión de salida 1%

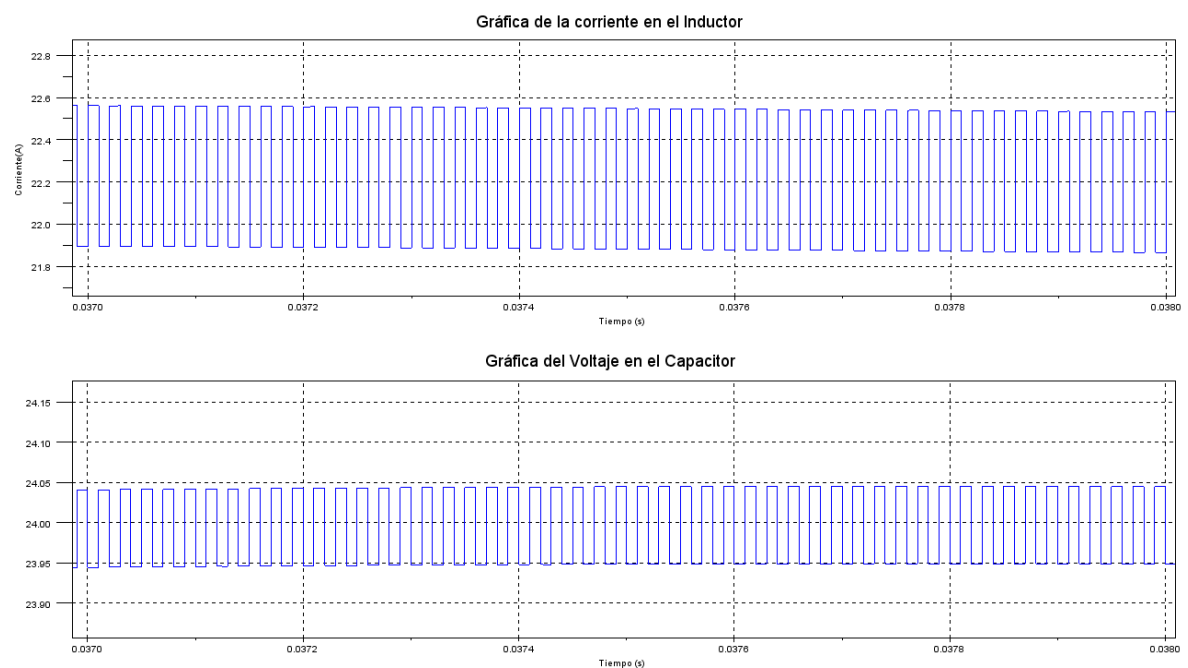
Se utiliza la ecuación (3.3) y (3.4) para el cálculo del inductor y del capacitor, teniendo un valor de  $0.18mH$  para el inductor y  $1.16 mF$  para el valor del capacitor.

Como se mencionó anteriormente para la simulación del conversor en Scilab se hace uso del modelo matemático del mismo. La definición del modelo matemático así como el código del programa principal utilizado para la simulación de este conversor se encuentra en el Anexo 2.





**Figura. 3. 3. Respuesta Conversor Tipo Boost  $\delta=0.5$**



**Figura. 3. 4. Respuesta Conversor Tipo Boost  $\delta=0.5$  (Señal Ampliada)**

Se puede observar en la Figura. 3.3 que la corriente del inductor se establece aproximadamente en un valor de 22 A en 0.025 s. De igual manera como en el convertidor buck la corriente presenta un sobreimpulso, sin embargo, a diferencia del convertidor buck, el valor de ésta no sobrepasa los 70<sup>a</sup>. Éste valor

de sobreimpulso es demasiado alto y a pesar de que este presente en la simulación, en la realidad no se presentará un valor tan alto de corriente. En la Figura. 3.4. se puede observar que el rizado es bajo alrededor de 15% lo cual está dentro de los parámetros de diseño.

El voltaje de salida, como se observa en la Figura. 3.3 presenta un sobreimpulso que llega hasta los 38 V sobrepasando la tensión de entrada considerablemente. El rizado obtenido mostrado en la Figura. 3.4 se encuentra dentro del rango deseado ya que el obtenido es 0.2%.

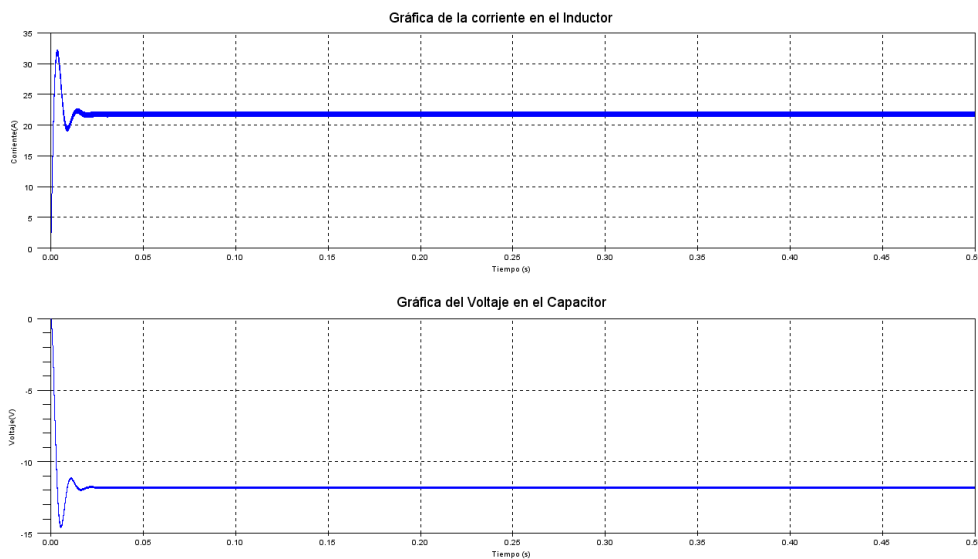
### 3.1.3. Simulación Conversor Tipo *Buck-Boost*

Los parámetros iniciales para el circuito del conversor *Buck-Boost* son:

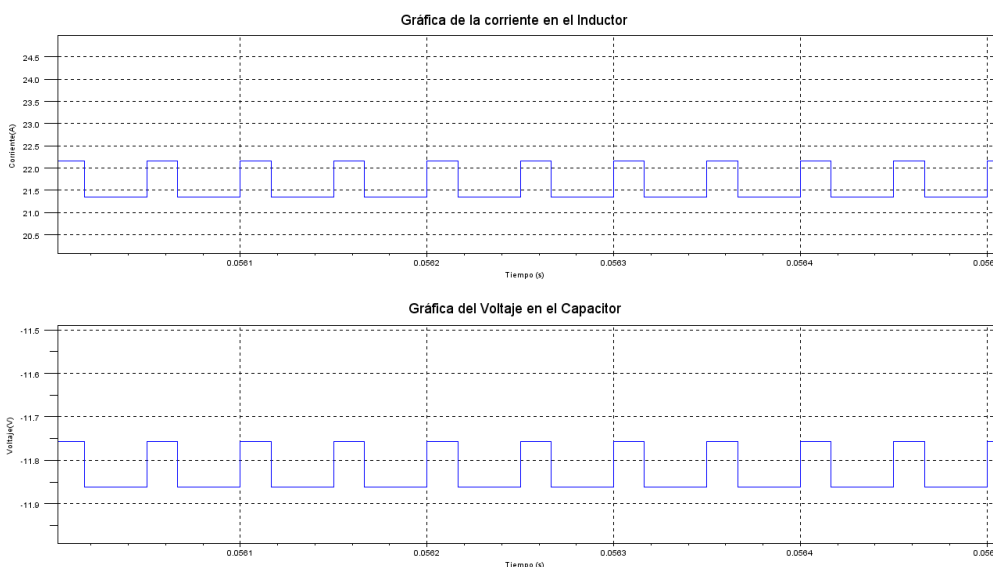
- Tensión de Entrada: 24 V
- Tensión de salida: 12 V
- Frecuencia de Trabajo: 20 KHz
- Corriente de Salida: 11 A
- Rizado de Tensión de salida 1%

Se utiliza la ecuación (3.3) y (3.4) para el cálculo del inductor y del capacitor, teniendo un valor de  $0.48mH$  para el inductor y  $2.29 mF$  para el valor del capacitor.

Como se mencionó anteriormente para la simulación del conversor en *Scilab* se hace uso del modelo matemático del mismo. La definición del modelo matemático así como el código del programa principal utilizado para la simulación de este conversor se encuentra en el Anexo 3.



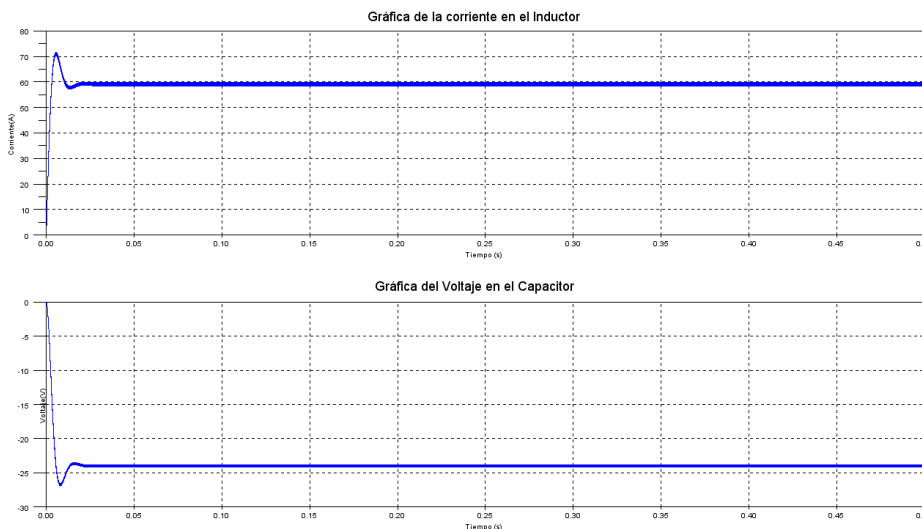
**Figura. 3. 5. Respuesta Conversor Tipo Buck-Boost  $\delta=0.34$**



**Figura. 3. 6. Respuesta Conversor Tipo Buck-Boost  $\delta=0.34$  (Señal Ampliada)**

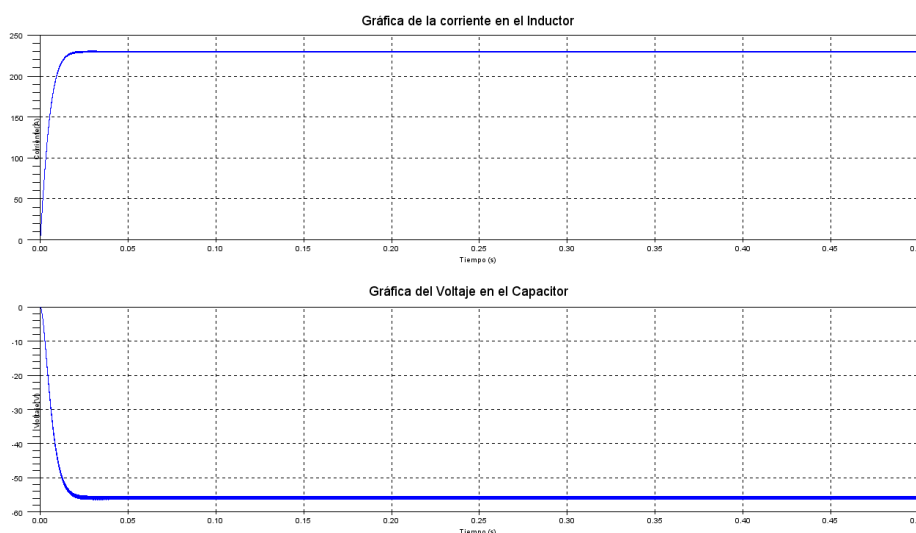
Se puede observar en la Figura. 3.5 que la tensión de salida obtenida de este conversor es invertida, es decir presenta valores negativos. La corriente del inductor se estabiliza aproximadamente en un valor de 22 A. Para ambas gráficas se observa la existencia de un sobreimpulso durante el estado transitorio.

El rizado obtenido mostrado en la Figura. 3.6 se encuentra dentro del rango deseado ya que el obtenido es 0.2%.



**Figura. 3. 7. Respuesta Conversor Tipo Buck-Boost  $\delta=0.5$**

En la Figura. 3.7 se observa que la tensión de salida cuando el valor de  $\delta=0.5$  es la misma que el voltaje de entrada, presentando un pequeño sobreimpulso. De igual manera se observa que el voltaje de salida es negativo. La corriente del inductor que presenta es positiva y tiene un valor aproximado de 60A.



**Figura. 3. 8. Respuesta Conversor Tipo Buck-Boost  $\delta=0.7$**

En la Figura. 3.8 se puede observar que la tensión de salida es mayor a la tensión de entrada y de igual forma se presenta de forma invertida. En esta ocasión se observa que no existen sobre impulsos, sin embargo, la corriente que atraviesa el inductor es demasiado alta, sobrepasando los valores de 200A, si bien ésta es la respuesta que entrega el simulador, no es la respuesta que se obtendrá en un circuito real.

Se puede observar en los resultados obtenidos para el conversor buck-boost que la tensión de salida es mayor o menor a la tensión de entrada de acuerdo al valor de  $\delta$  sin embargo mientras el voltaje de salida sea mayor la corriente que atraviesa por la bobina aumenta considerablemente, de igual manera, el sobre impulso presente se reduce hasta desaparecer.

#### **3.1.4. Simulación Conversor Tipo Cuk**

Los parámetros iniciales para el circuito del conversor *cuk* son:

- Tensión de Entrada: 24 V
- Tensión de salida: 12 V
- Frecuencia de Trabajo: 20 KHz
- Corriente de Salida: 11 A
- Rizado de Tensión de salida 1%

Se utiliza un valor de  $0.1688mH$  para el valor del inductor y  $1.15mF$  para el valor del capacitor.

Como se mencionó anteriormente para la simulación del conversor en *Scilab* se hace uso del modelo matemático del mismo. La definición del modelo matemático así como el código del programa principal utilizado para la simulación de este conversor se encuentra en el Anexo 4.

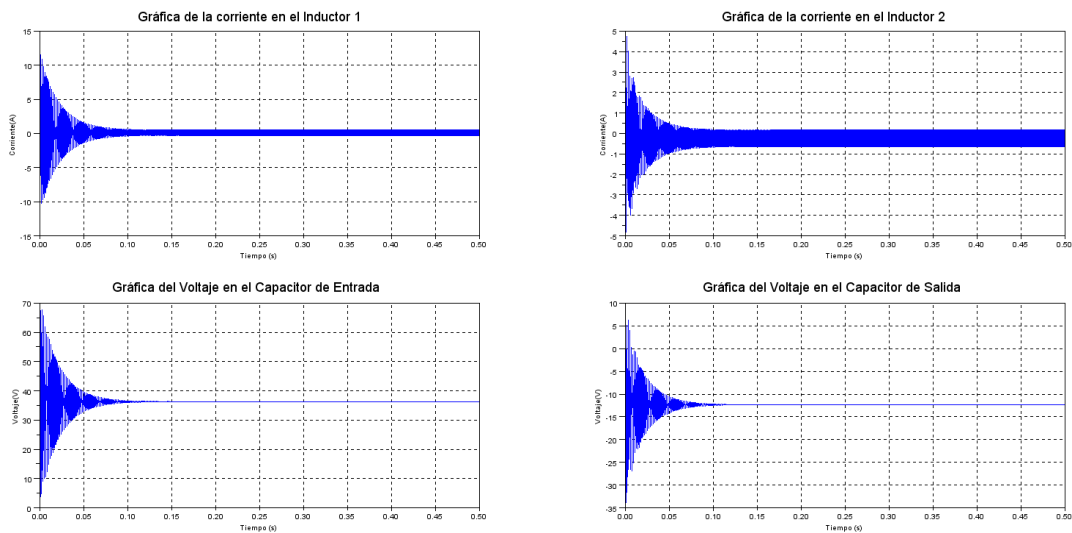


Figura. 3. 9. Respuesta Conversor Tipo Cuk  $\delta=0.34$

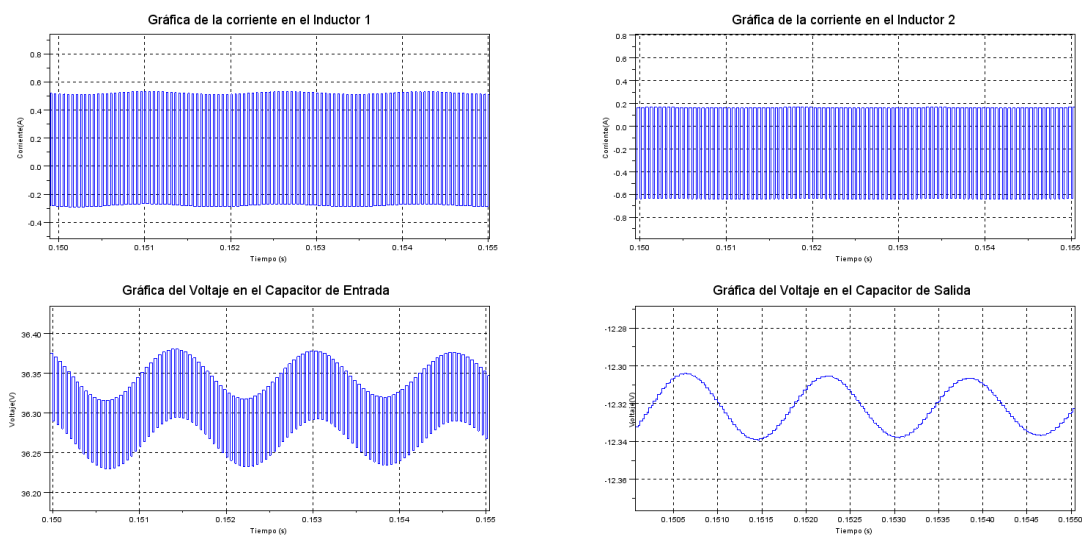
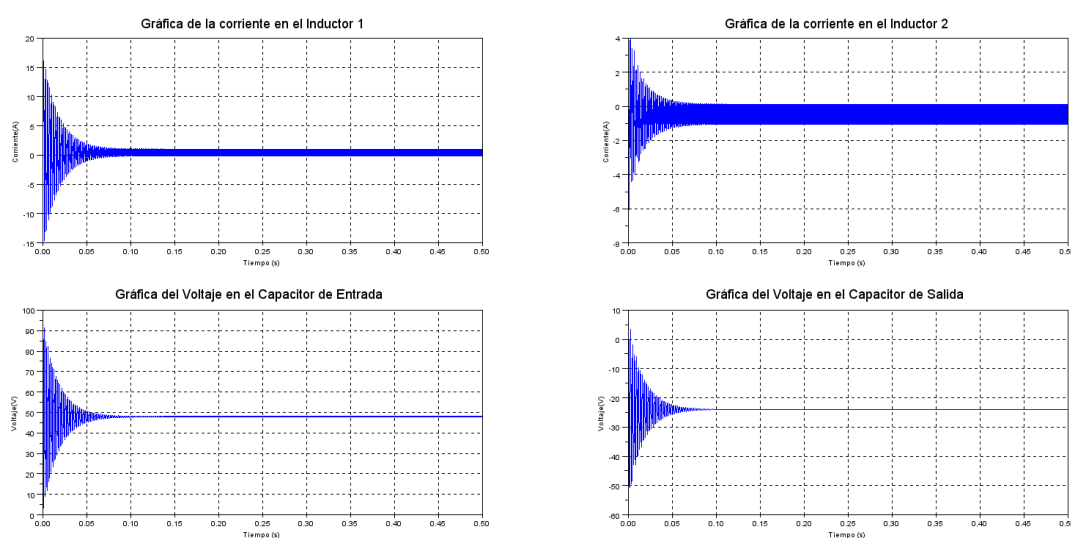


Figura. 3. 10. Respuesta Conversor Tipo Cuk  $\delta=0.34$  (Señal Ampliada)

Se puede observar en la Figura. 3.9 que la tensión de salida obtenida de este conversor es invertida, es decir con polaridad opuesta a la tensión aplicada a la entrada. A diferencia del convertidor buck-boost, el convertidor cuk presenta dos inductores y dos capacitores, las señales de estos están presentes en las señales resultantes. Para las gráficas se observa la existencia de sobreimpulsos durante el estado transitorio de la señal. Sin embargo, se puede observar que la corriente obtenida en los inductores es próxima a cero, lo cual podría llevar a modos de conducción discontinua del circuito.

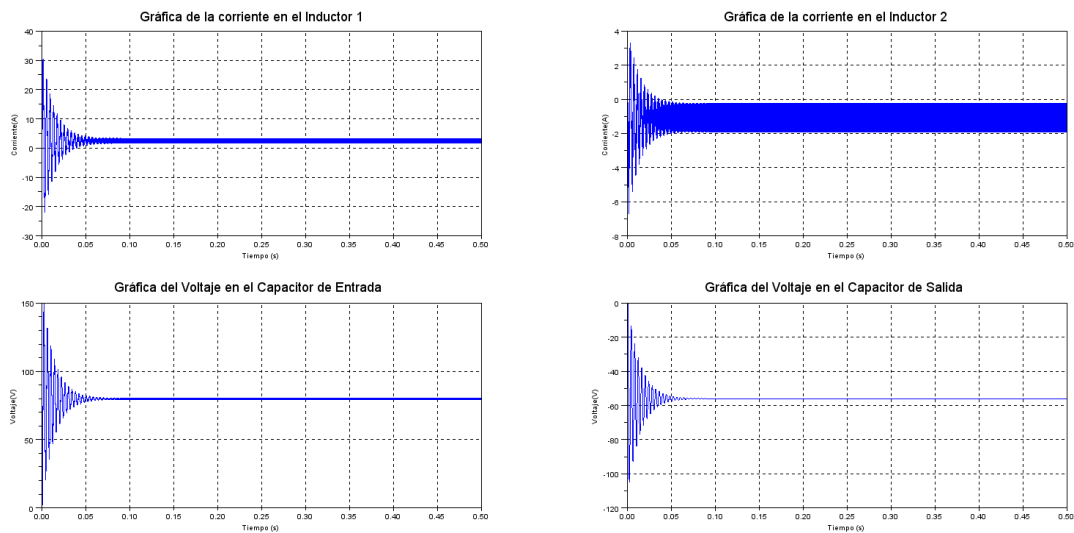
Se observa además, que el voltaje obtenido en el capacitor de entrada es mayor que la tensión aplicada al circuito y de polaridad positiva aproximadamente 36V, mientras que el capacitor de salida la polaridad es contraria y el valor obtenido es el deseado 12V y el rizado obtenido mostrado en la Figura. 3.10 se encuentra dentro del rango deseado ya que el obtenido es 0.3% para el voltaje de salida y 0.8% para la tensión presente en el capacitor de entrada.



**Figura. 3. 11. Respuesta Conversor Tipo Cuk  $\delta=0.5$**

En la Figura. 3.11 se observa que la tensión de salida cuando el valor de  $\delta=0.5$  es igual que la tensión de entrada aproximadamente -24V, presentando de igual manera sobreimpulsos durante el estado transitorio de la señal. Así mismo, se observa que el voltaje de salida es negativo, de polaridad opuesta a la tensión de entrada.

La tensión presente en el capacitor de entrada ha aumentado a un valor de 49V y el valor máximo de los picos presentes en las señales ha aumentado con relación a los obtenidos con un  $\delta$  menor. De igual manera los valores de las corrientes de las bobinas se aproximan a cero.



**Figura. 3. 12. Respuesta Conversor Tipo Cuk  $\delta=0.7$**

Como se puede observar en la Figura. 3.12 la tensión de salida en el convertidor cuk cuando  $\delta = 0.7$  es mayor a la tensión de entrada y de igual forma se presenta de polaridad opuesta a la de la tensión de entrada. A diferencia de la respuesta obtenida en el convertidor buck-boost, el convertidor cuk continúa presentando sobre impulsos incluso en este caso que la tensión de salida es mayor.

El voltaje en el capacitor de entrada ha aumentado a 80V. Mientras la corriente en el inductor 1 ha aumentado, la corriente que circula por el inductor 2 ha disminuido, no obstante estas variaciones no son demasiado grandes.

Se puede observar en los resultados obtenidos para el convertidor cuk que la tensión de salida es mayor o menor a la tensión de entrada de acuerdo al valor de  $\delta$  como el convertidor buck-boost. Si el valor de este parámetro es menor a 0.5 e, la tensión de salida será menor a la tensión de entrada, caso contrario, si el valor de  $\delta$  es mayor a 0.5 la tensión de salida del circuito será mayor a la tensión aplicada al mismo, y si el valor dado a  $\delta$  iguala a 0.5 el valor obtenido a la salida es el valor de tensión que se aplicó a la entrada.

Una desventaja de este convertidor con respecto al buck-boost es que presenta mayor cantidad de elementos es decir más inductores y capacitores, lo cual dificulta su construcción.



### 3.1.5. Simulación Conversor Tipo Sepic

Como se ha visto hasta este punto se ha venido desarrollando un análisis a breves rasgos de los resultados obtenidos por los convertidores dc-dc presentados en el capítulo anterior. Sin embargo, en este punto se pretende realizar un análisis más detallado del conversor Sepic debido a que éste es el conversor seleccionado para ser optimizado.

En primer lugar se presenta las ecuaciones necesarias para determinar los distintos valores de los elementos que se utilizan en este conversor. Para la selección del inductor, se debe tomar en cuenta el rizado de la corriente para esto, se parte del criterio que esta variación debe estar entre el 20% y 40% del valor máximo de la corriente de entrada<sup>14</sup>.

$$\Delta i_L = I_i \times 40\% = I_o \frac{V_o}{V_i} \times 40\% \quad (3.5)$$

Ahora bien, el valor de los inductores es calculado como se muestra en la ecuación 3.6, se observa que en esta ecuación interviene el valor del rizado de la corriente (ecuación (3.5)) y el ciclo de trabajo que puede ser despejado a partir de la ecuación 2.23.

$$L_1 = L_2 = \frac{V_i}{\Delta i_L f} \delta \quad (3.6)$$

Para definir el valor de los capacitores, se toma el criterio que el valor del capacitor de entrada debe ser superior o igual a 10  $\mu\text{F}$ <sup>15</sup> debido a que este no es tan crítico en la aplicación se lo puede seleccionar sin realizar ningún cálculo extra. Por otro lado para el capacitor de salida se utiliza la ecuación (3.7)

$$C_2 \geq \frac{i_o}{0.5 \Delta V_c f} \quad (3.7)$$

Para la simulación y los cálculos respectivos del conversor Sepic se ha tomado en cuenta los siguientes parámetros:

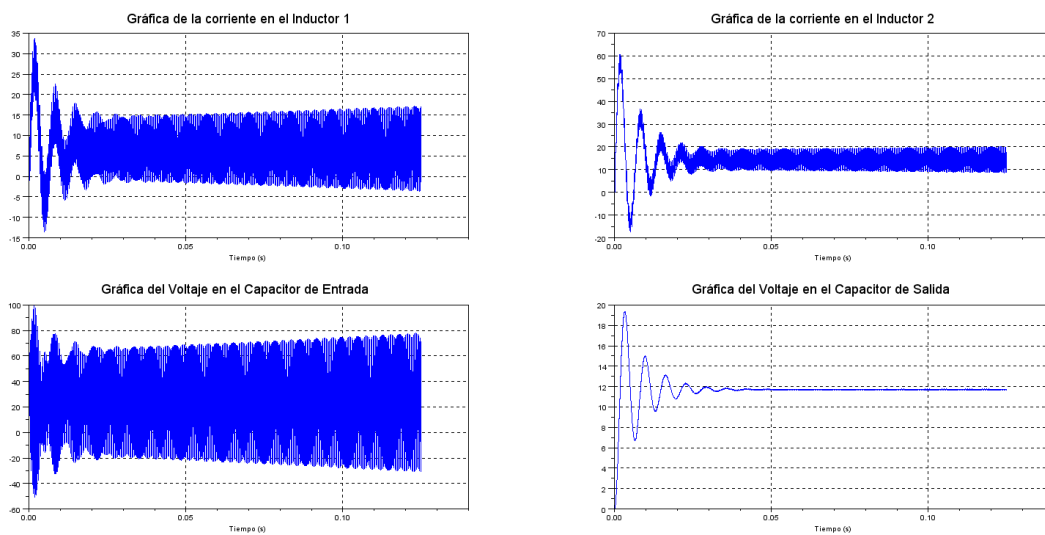
<sup>14</sup> <http://www.ti.com/lit/an/slyt309/slyt309.pdf>

<sup>15</sup> <http://www.ti.com/lit/an/snva168d/snva168d.pdf>

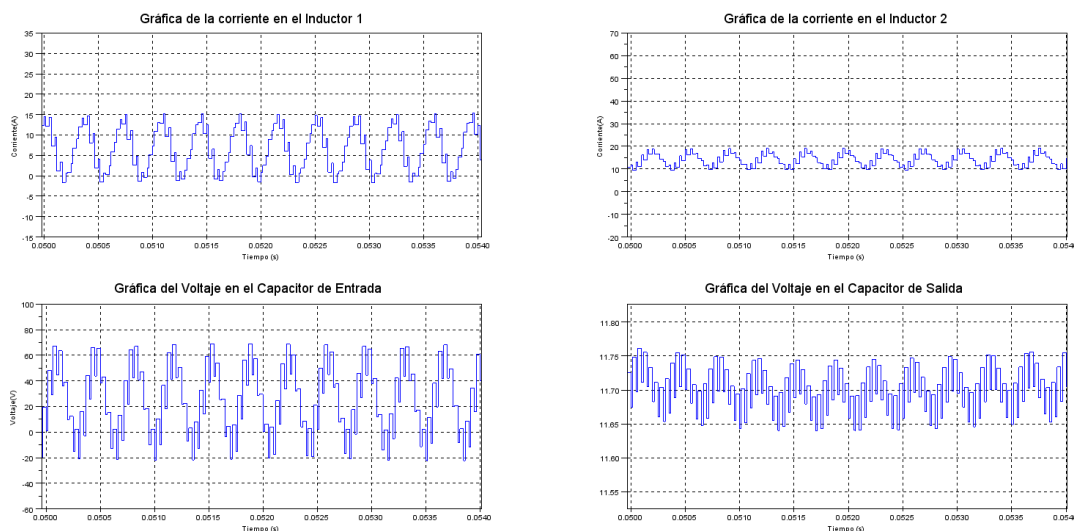
- Tensión de Entrada: 24 V
- Tensión de salida: 12 V
- Frecuencia de Trabajo: 20 KHz
- Corriente de Salida: 11 A
- Rizado de Tensión de salida 1%
- Rizado de la corriente 40%

Realizando los cálculos necesarios se determina un valor de  $0.178mH$  para los inductores,  $10\mu F$  para el capacitor de entrada y  $4.7mF$  para el valor del capacitor de salida.

Como se mencionó anteriormente para la simulación del convertor en *Scilab* se hace uso del modelo matemático del mismo. La definición del modelo matemático así como el código del programa principal utilizado para la simulación de este convertor se encuentra en el Anexo 5.



**Figura. 3. 13. Respuesta Convertor Tipo Sepic  $\delta=0.34$**

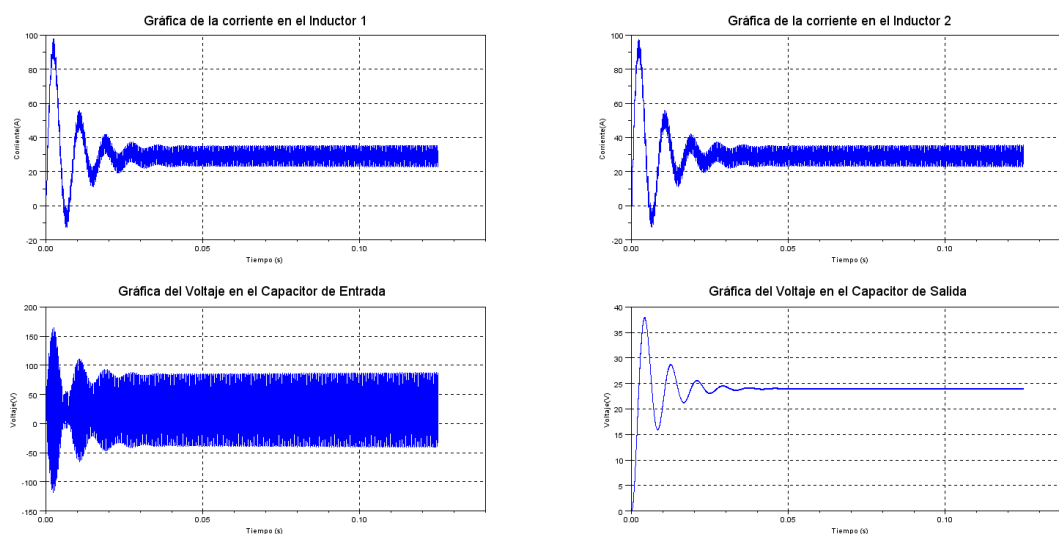


**Figura. 3. 14. Respuesta Conversor Tipo Sepic  $\delta=0.34$  (Señal Ampliada)**

Se puede observar en la Figura. 3.13 que la tensión de salida obtenida de este conversor, a diferencia del buck-boost y del cuk, tiene la misma polaridad de la tensión de entrada. De igual forma que el cuk, el conversor Sepic necesita de dos inductores y dos capacitores, cuyas respuestas se encuentran en las figuras de las señales resultantes.

De igual manera que los conversores anteriores se puede observar que para las gráficas se observa la existencia de sobreimpulsos durante el estado transitorio de la señal. Sin embargo, las variaciones de corriente que se presentan son bastante altas, en el inductor 1 se puede observar que la corriente oscila entre 0 y 15A mientras que en el inductor 2 ésta varía entre 10 y 20A. La variación de voltaje presente en el capacitor 1 es demasiado amplia, esta recorre desde -20 a 70V. Estas respuestas nos presentan que el conversor trabaja con una corriente pulsante pero a pesar de esto, el voltaje en la salida es el esperado 12V y con un rizado de 0.8%.

Si bien en la Figura.3.13 se aprecia que la variación de corriente en el inductor 1 y de tensión en el capacitor1 crecen en forma paulatina sin embargo, ésta variación llega a estabilizarse, no se puede distinguir el punto en el que se estabilizan debido al tiempo de simulación.

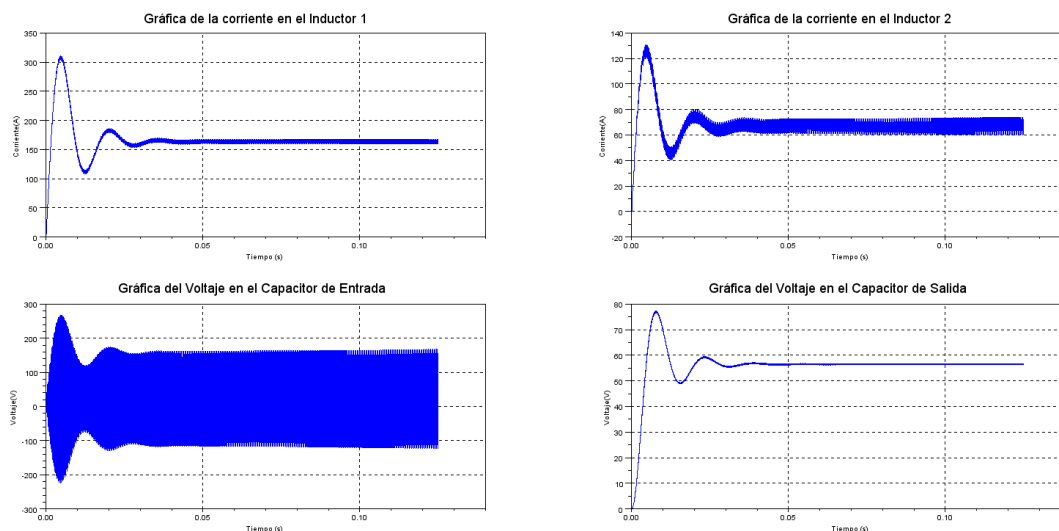


**Figura. 3. 15. Respuesta Conversor Tipo Sepic  $\delta=0.5$**

En la Figura. 3.15 se observa que la tensión de salida cuando el valor de  $\delta=0.5$  es igual que la tensión de entrada aproximadamente 24V, presentando de igual manera sobreimpulsos durante el estado transitorio de la señal, el pico mayor de esta señal alcanza los 37V. El rizado de la tensión de salida durante el estado estable cumple el valor requerido de 1%.

La corriente presente en los inductores es la misma con un valor promedio de 25A de igual forma, varía desde los 20 a 30A. La tensión presente en el capacitor de entrada ha aumentado a un valor de 60V y sigue presentando una variación extremadamente grande desde -40 a 60V. El valor máximo de los picos presentes en las señales ha aumentado con relación a los obtenidos con un  $\delta$  menor.

Como se puede observar en la Figura. 3.16 la tensión de salida en el convertidor sepic cuando  $\delta =0.7$  es mayor a la tensión de entrada llegando a los 57V. De la misma forma, continua la presencia de sobre impulsos en las señales, el pico máximo de la tensión de salida alcanza los 75V. El rizado presente en la señal de salida cumple con la condición inicial del 1%.



**Figura. 3. 16. Respuesta Conversor Tipo Sepic  $\delta=0.7$**

El voltaje en el capacitor de entrada ha aumentado estableciéndose entre los -100 y 100V, es decir continua con una variación extremadamente grande. Por otro lado la corriente del inductor 1 ha aumentado considerablemente, sin embargo el rango de variación ha disminuido. La corriente del inductor 2 ha aumentado pero no de manera extrema como la que atraviesa el inductor 1.

Se puede observar en los resultados obtenidos para el conversor sepic que la tensión de salida es mayor o menor a la tensión de entrada de acuerdo al valor de  $\delta$  de igual manera que en los conversores buck-boost y cuk. Si el valor de este parámetro es menor a 0.5 e, la tensión de salida será menor a la tensión de entrada, caso contrario, si el valor de  $\delta$  es mayor a 0.5 la tensión de salida del circuito será mayor a la tensión aplicada al mismo, y si el valor dado a  $\delta$  iguala a 0.5 el valor obtenido a la salida es el valor de tensión que se aplicó a la entrada.

De la misma manera que el conversor Cuk, la desventaja de este convertidor es la cantidad de elementos que se necesita para su construcción es decir dos inductores y dos capacitores, lo cual dificulta su construcción. Sin embargo la diferencia que presenta con respecto al Cuk es la tensión no invertida que presenta a la salida y la corriente pulsatoria con la que trabaja.

### 3.2. SIMULACIONES DE CONVERTIDORES CON OPENMODELICA

Las simulaciones que se presentan a continuación son realizadas utilizando el *software* OpenModelica, para esto se hace uso del modelo matemático de las diferentes topologías de convertidores dc-dc, además se hace uso de la librerías de Modelica para la creación de la señal cuadrada necesaria para la simulación.

Los valores de los elementos utilizados son los mismos que los calculados en el punto anterior para las simulaciones realizadas en Scilab. De igual manera, las respuestas presentadas gracias a las simulaciones son: la corriente obtenida en el inductor del circuito y el voltaje de salida obtenido, para cada una de las topologías de los convertidores DC-DC.

Para el análisis de los convertidores se ha optado por trabajar en una frecuencia de 20KHz. Los distintos convertidores trabajan con una carga puramente resistiva, para determinar el valor de dicha resistencia se hace uso de las corrientes y voltajes de salida requeridos.

#### 3.2.1 Simulación Conversor Tipo *Buck*

Los parámetros iniciales para el circuito del conversor *Buck* son:

- Tensión de Entrada: 24 V
- Tensión de salida: 12 V
- Frecuencia de Trabajo: 20 KHz
- Corriente de Salida: 11 A
- Rizado de Tensión de salida 1%

Se utiliza para la simulación un valor de  $0.1688mH$  para el inductor y  $1.04mF$  para el valor del capacitor.

El código utilizado en OpenModelica para la simulación de este conversor se encuentra en el Anexo 6.

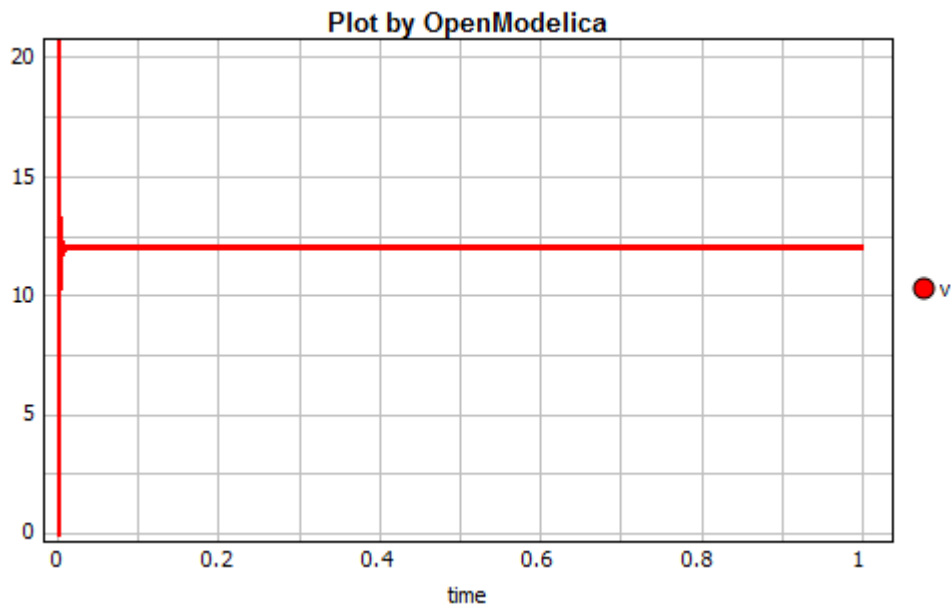


Figura. 3. 17. Tensión en el Capacitor en el Conversor Tipo Buck  $\delta=0.5$

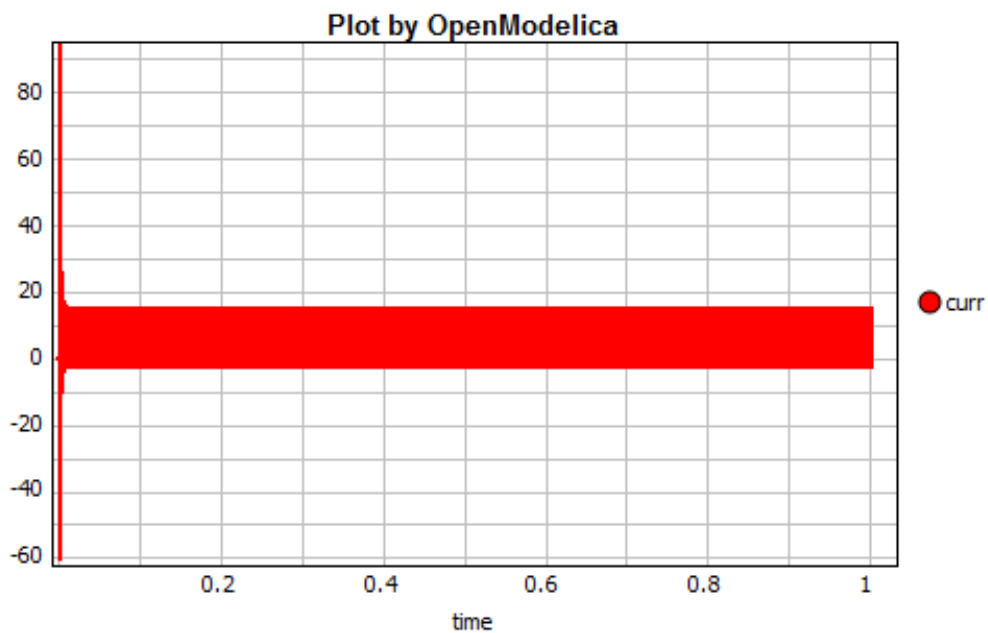


Figura. 3. 18. Corriente en el Inductor en el Conversor Tipo Buck  $\delta=0.5$

En la Figura. 3.18 se puede observar que la corriente obtenida en el inductor tiene un valor medio aproximado de 11 A. Se puede observar que la corriente tiene un pico demasiado alto, sobrepasando los 100A durante su estado transitorio, ésta varía entre valores positivos y negativos de corriente antes de

estabilizarse como se espera. A pesar de obtener este valor alto en la simulación, en la realidad no es posible obtener un valor tan alto como 100A como respuesta.

De la misma manera, es posible observar que la señal de salida presenta varios sobreimpulsos antes de estabilizarse, estos sobreimpulsos sin embargo, no sobrepasan el valor del voltaje de entrada al circuito. En la Figura. 3.17 se puede observar que el rizado obtenido a la salida es insignificante, debido a que se especificó que el valor de rizado deseado como 1%.

### 3.2.2 Simulación Conversor Tipo *Boost*

Los parámetros iniciales para el circuito del conversor *Boost* son:

- Tensión de Entrada: 12 V
- Tensión de salida: 24 V
- Frecuencia de Trabajo: 20 KHz
- Corriente de Salida: 11 A
- Rizado de Tensión de salida 1%

Se utiliza para la simulación un valor de  $0.18mH$  para el inductor y  $1.16 mF$  para el valor del capacitor.

El código utilizado en OpenModelica para la simulación de este conversor se encuentra en el Anexo 7.



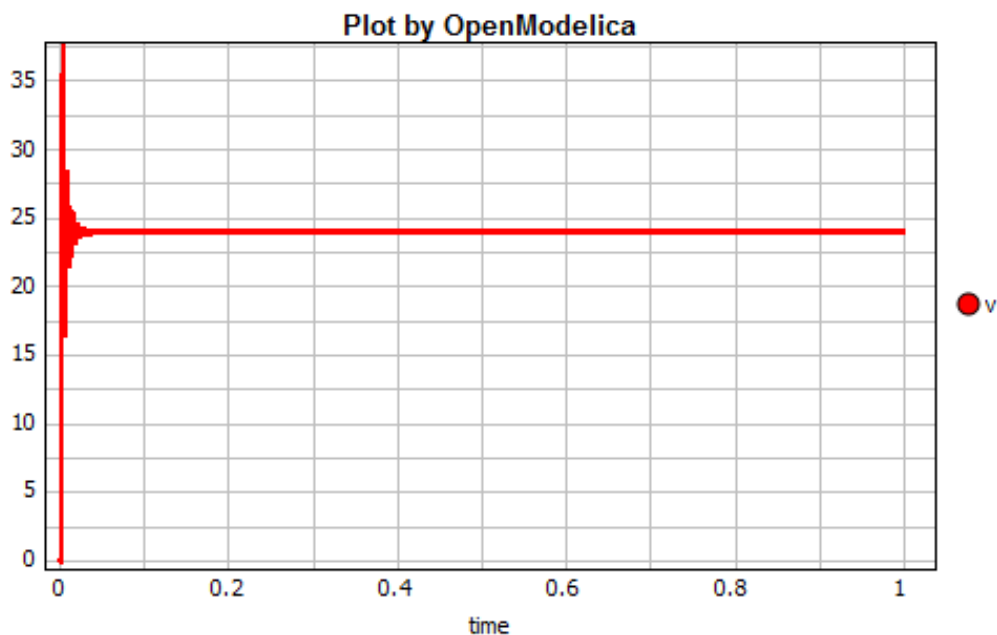


Figura. 3. 19. Tensión en el Capacitor en el Convertor Tipo Boost  $\delta=0.5$

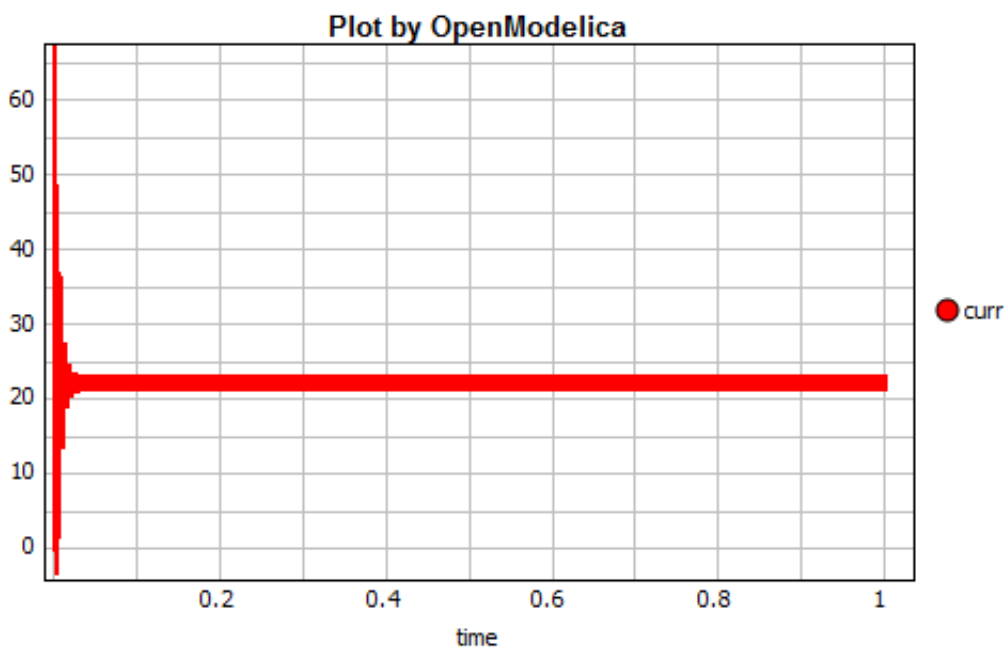


Figura. 3. 20. Corriente en el Inductor en el Convertor Tipo Boost  $\delta=0.5$

Se puede observar en la Figura. 3.20 que la corriente del inductor se establece aproximadamente en un valor de 22 A en 0.025 s. De igual manera como en el convertidor buck la corriente presenta un sobreimpulso, sin embargo, a diferencia del convertidor buck, el valor de ésta no sobrepasa los 70A. Éste valor de sobreimpulso es demasiado alto y a pesar de que esté presente en la

simulación, en la realidad no se presentará un valor tan alto de corriente. Se puede observar que el rizado es bajo alrededor de 15% lo cual está dentro de los parámetros de diseño.

El voltaje de salida, como se observa en la Figura. 3.19 presenta un sobreimpulso que llega hasta los 38 V sobrepasando la tensión de entrada considerablemente. El rizado obtenido mostrado se encuentra dentro del rango deseado ya que el obtenido es 0.2%.

### 3.2.3 Simulación Conversor Tipo *Buck-Boost*

Los parámetros iniciales para el circuito del conversor *Buck-Boost* son:

- Tensión de Entrada: 24 V
- Tensión de salida: 12 V
- Frecuencia de Trabajo: 20 KHz
- Corriente de Salida: 11 A
- Rizado de Tensión de salida 1%

Se utiliza para la simulación un valor de  $0.48mH$  para el inductor y  $2.29 mF$  para el valor del capacitor.

El código utilizado en OpenModelica para la simulación de este conversor se encuentra en el Anexo 8.

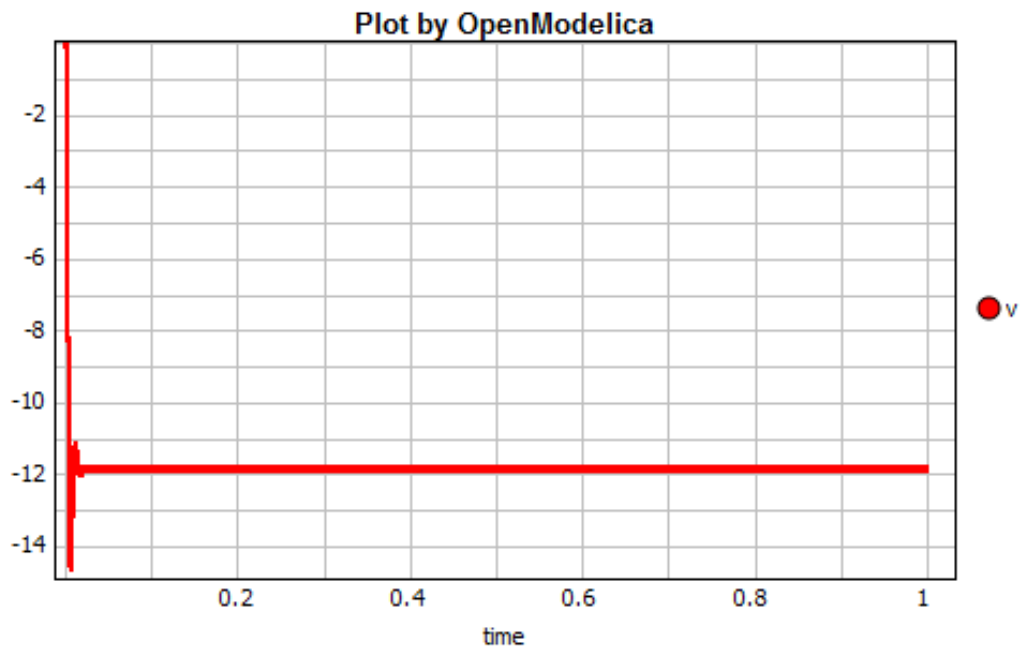


Figura. 3. 21. Tensión en el Capacitor en el Conversor Tipo Buck-Boost  $\delta=0.34$

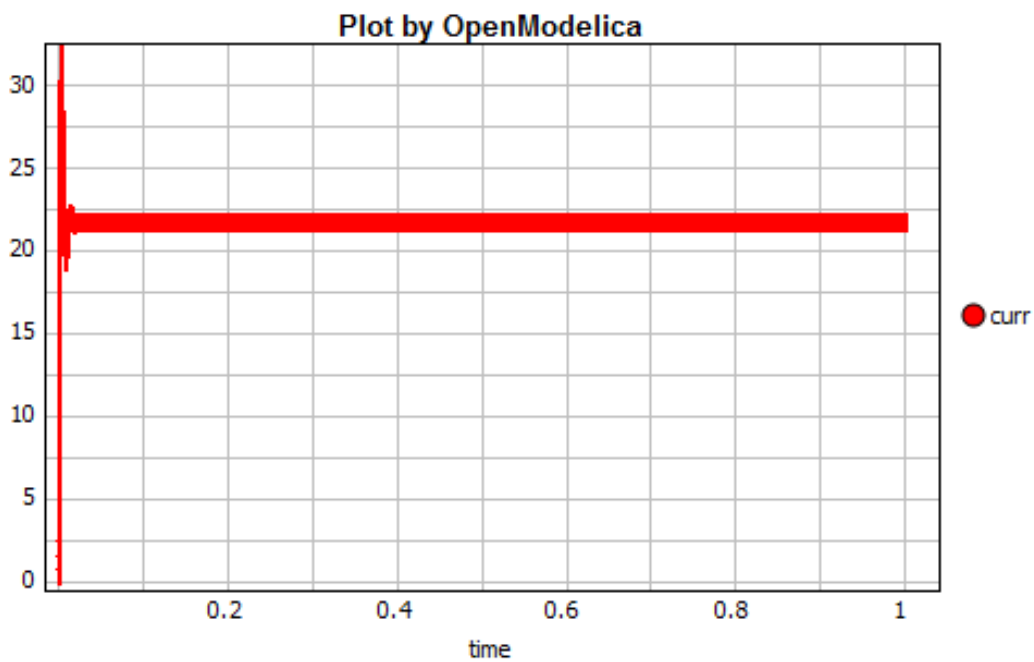


Figura. 3. 22. Corriente en el Inductor en el Conversor Tipo Buck-Boost  $\delta=0.34$

Se puede observar en la Figura. 3.21 que la tensión de salida obtenida de este conversor es invertida, es decir presenta valores negativos. La corriente del inductor se estabiliza aproximadamente en un valor de 22 A. Para ambas gráficas se observa la existencia de un sobrepulso durante el estado transitorio.

El rizado obtenido mostrado en la Figura. 3.22 se encuentra dentro del rango deseado ya que el obtenido es 0.2%.

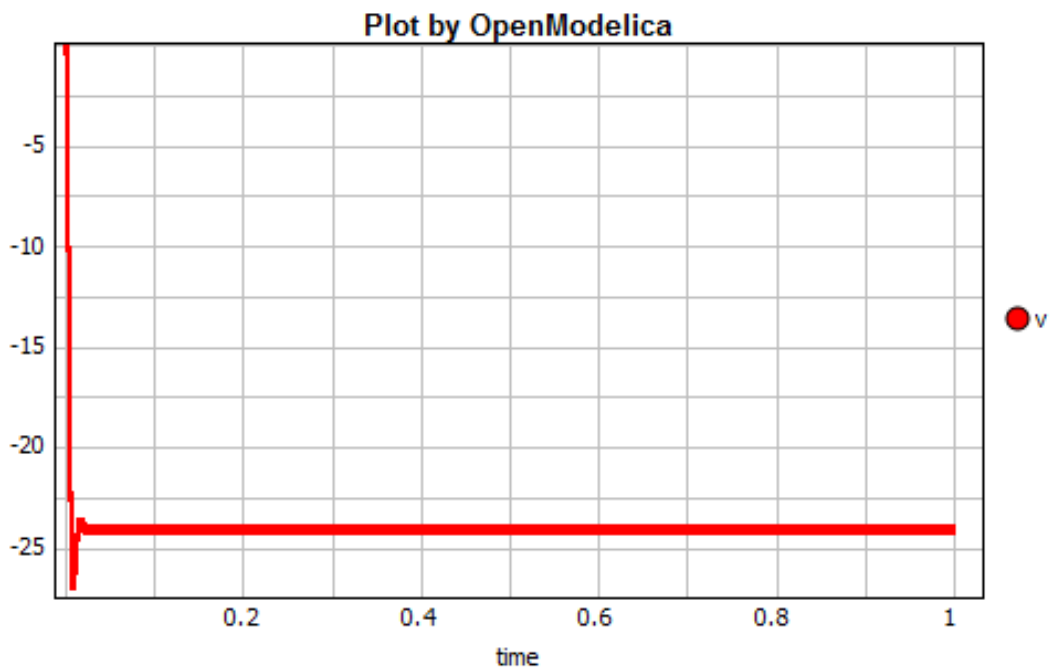


Figura. 3. 23. Tensión en el Capacitor en el Conversor Tipo Buck-Boost  $\delta=0.5$

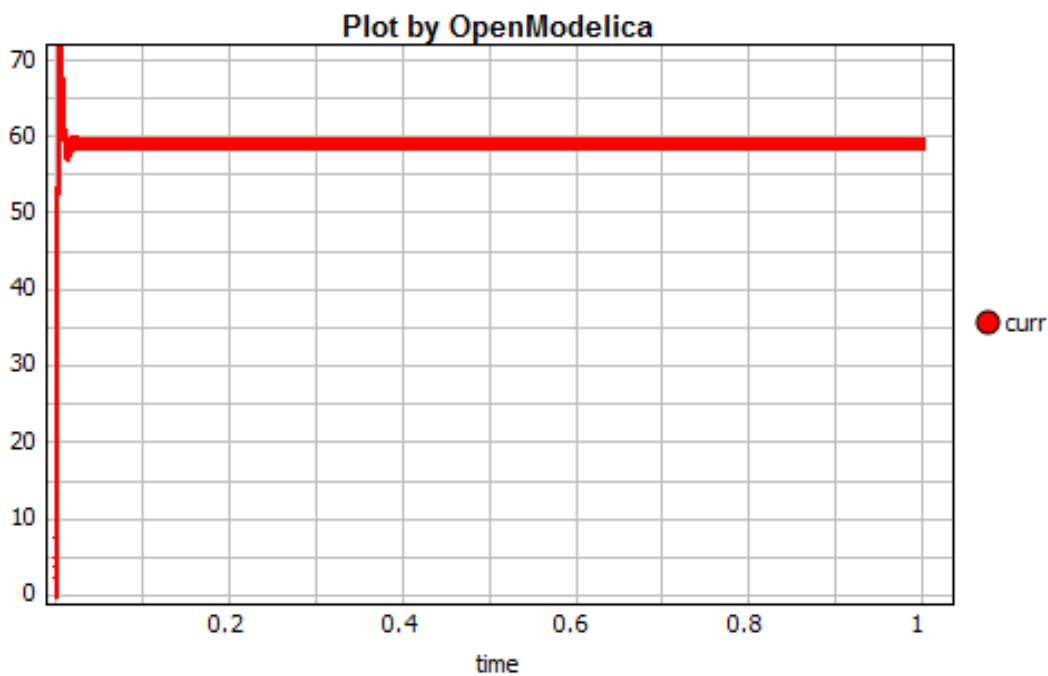


Figura. 3. 24. Corriente en el Inductor en el Conversor Tipo Buck-Boost  $\delta=0.5$

En la Figura. 3.23 y 3.24 se observa que la tensión de salida cuando el valor de  $\delta=0.5$  es la misma que el voltaje de entrada, presentando un pequeño sobreimpulso. De igual manera se observa que el voltaje de salida es negativo. La corriente del inductor que presenta es positiva y tiene un valor aproximado de 60A.

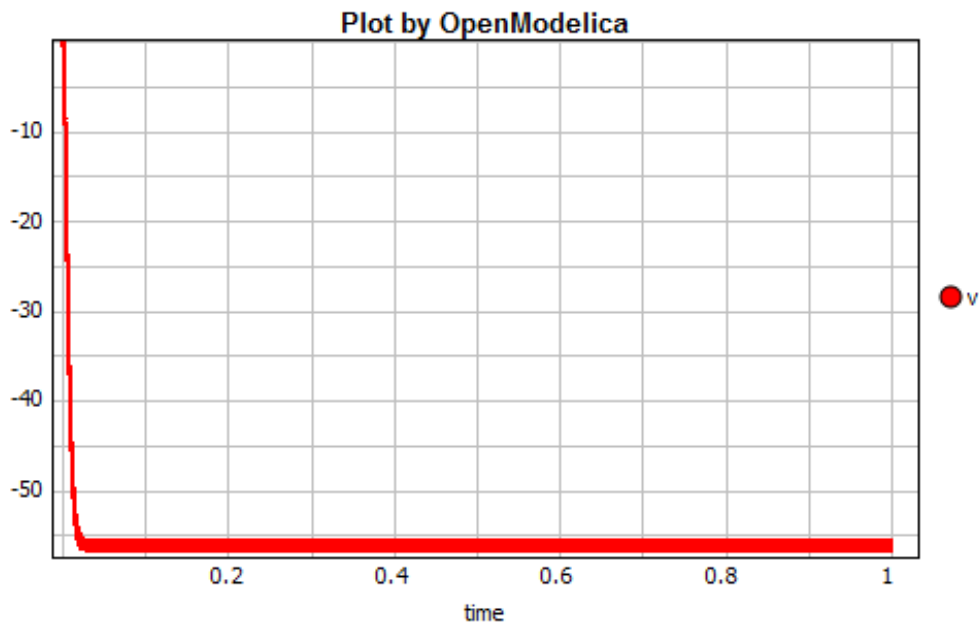


Figura. 3. 25. Tensión en el Capacitor en el Conversor Tipo Buck-Boost  $\delta=0.7$

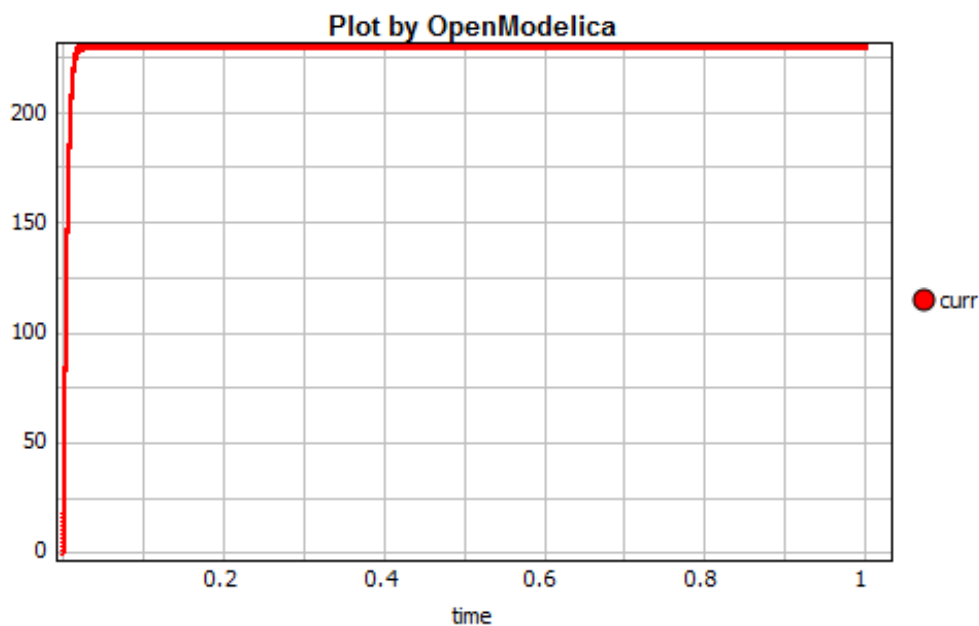


Figura. 3. 26. Corriente en el Inductor en el Conversor Tipo Buck-Boost  $\delta=0.7$

En la Figura. 3.25 y 3.26 se puede observar que la tensión de salida es mayor a la tensión de entrada y de igual forma se presenta de forma invertida. En esta ocasión se observa que no existen sobre impulsos, sin embargo, la corriente que atraviesa el inductor es demasiado alta, sobrepasando los valores de 200A, si bien ésta es la respuesta que entrega el simulador, no es la respuesta que se obtendrá en un circuito real.

Se puede observar en los resultados obtenidos para el conversor buck-boost que la tensión de salida es mayor o menor a la tensión de entrada de acuerdo al valor de  $\delta$  sin embargo mientras el voltaje de salida sea mayor la corriente que atraviesa por la bobina aumenta considerablemente, de igual manera, el sobre impulso presente se reduce hasta desaparecer.

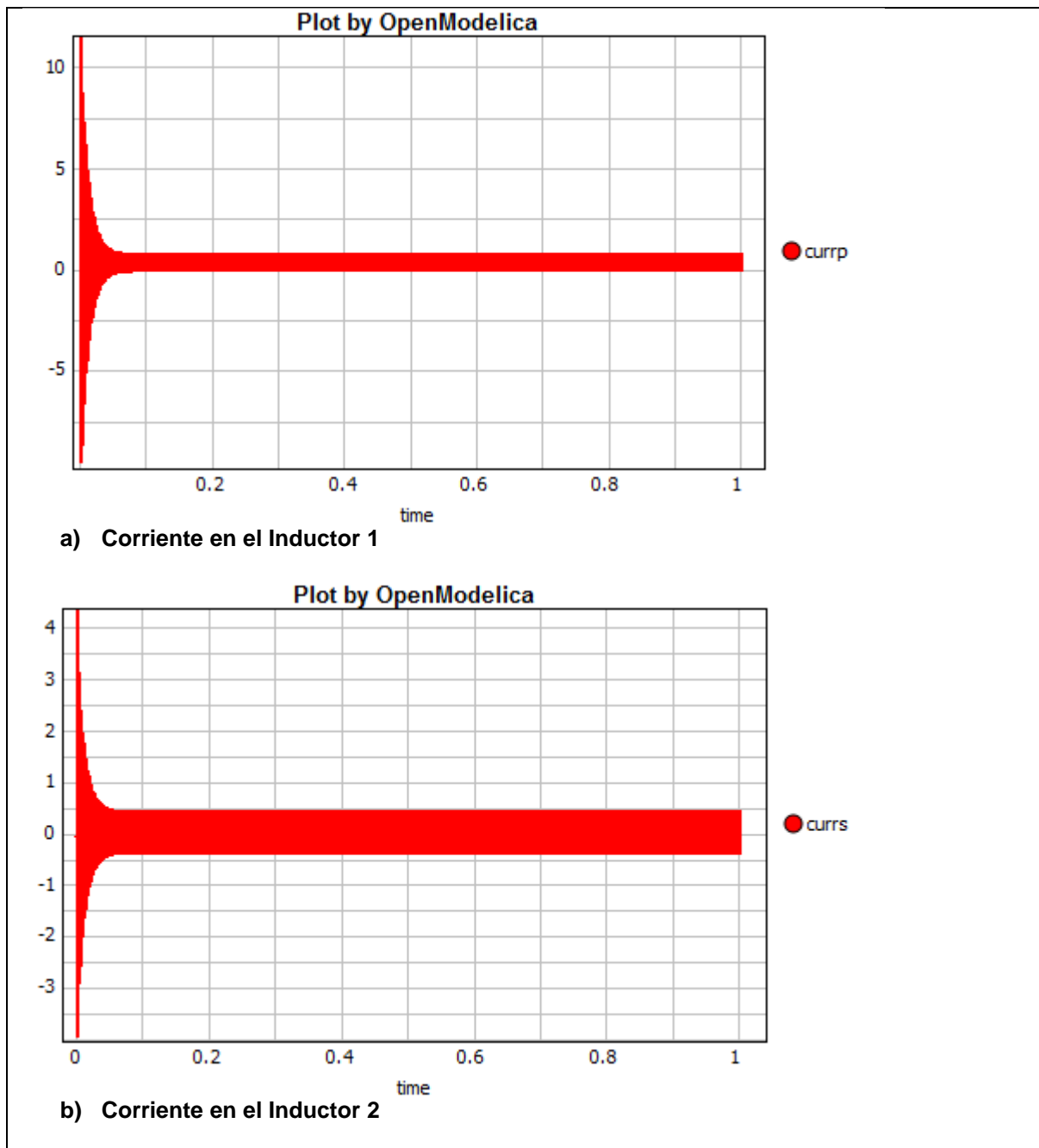
### 3.2.4 Simulación Conversor Tipo *Cuk*

Los parámetros iniciales para el circuito del conversor *cuk* son:

- Tensión de Entrada: 24 V
- Tensión de salida: 12 V
- Frecuencia de Trabajo: 20 KHz
- Corriente de Salida: 11 A
- Rizado de Tensión de salida 1%

Se utiliza un valor de  $0.1688mH$  para el valor del inductor y  $1.15mF$  para el valor del capacitor.

El código utilizado en OpenModelica para la simulación de este conversor se encuentra en el Anexo 9.



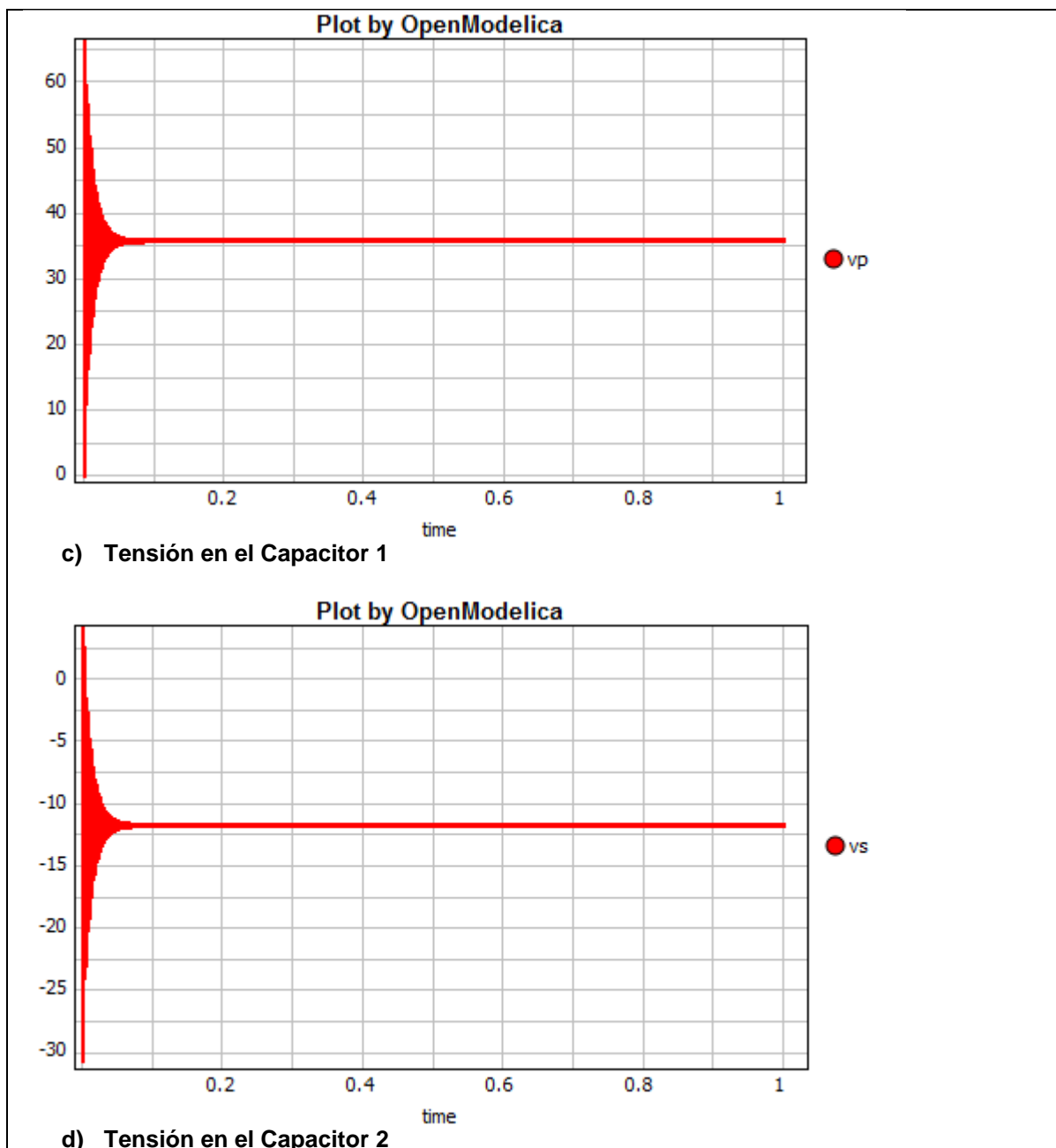


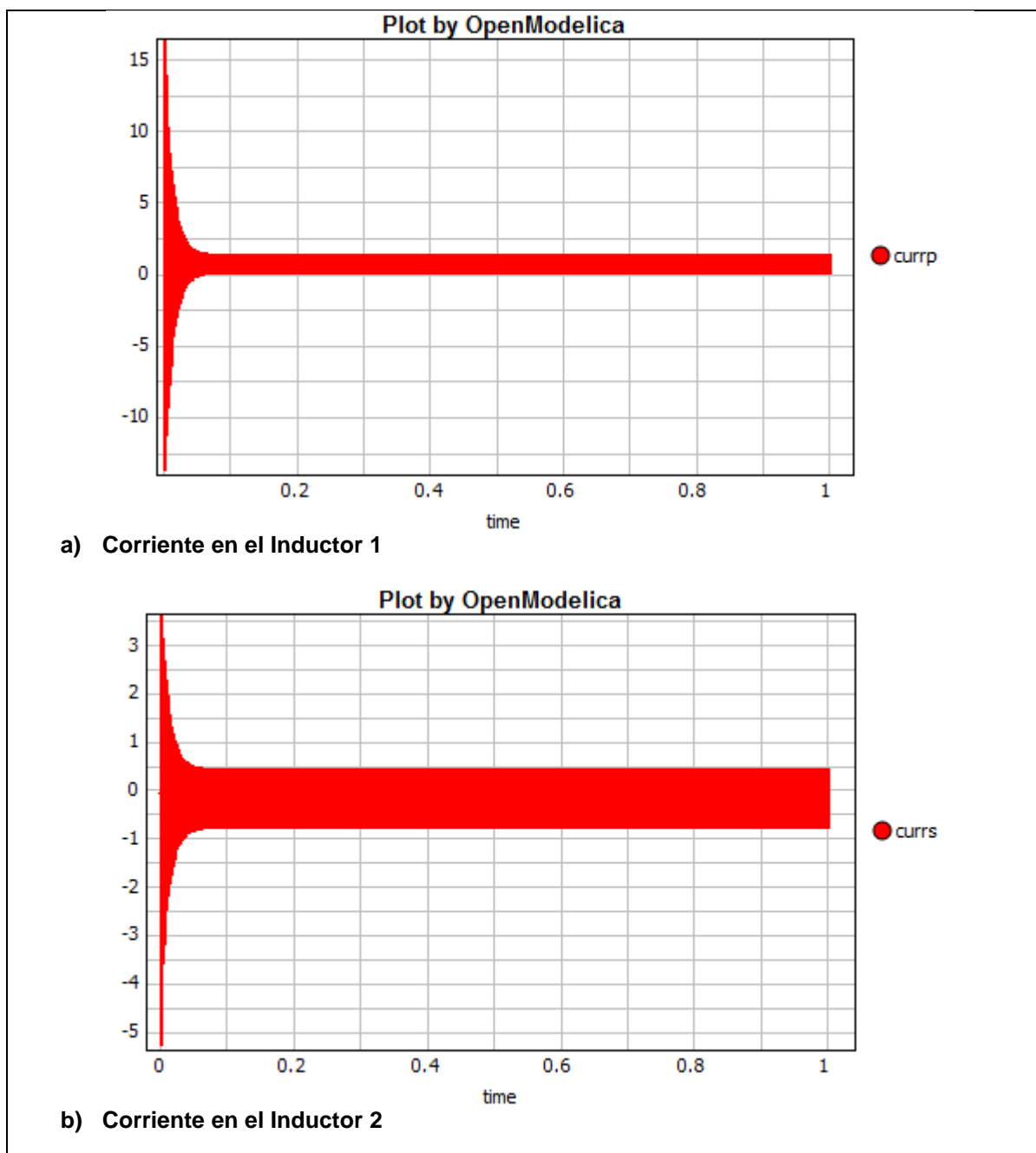
Figura. 3. 27. Respuesta Conversor Tipo Cuk  $\delta=0.34$

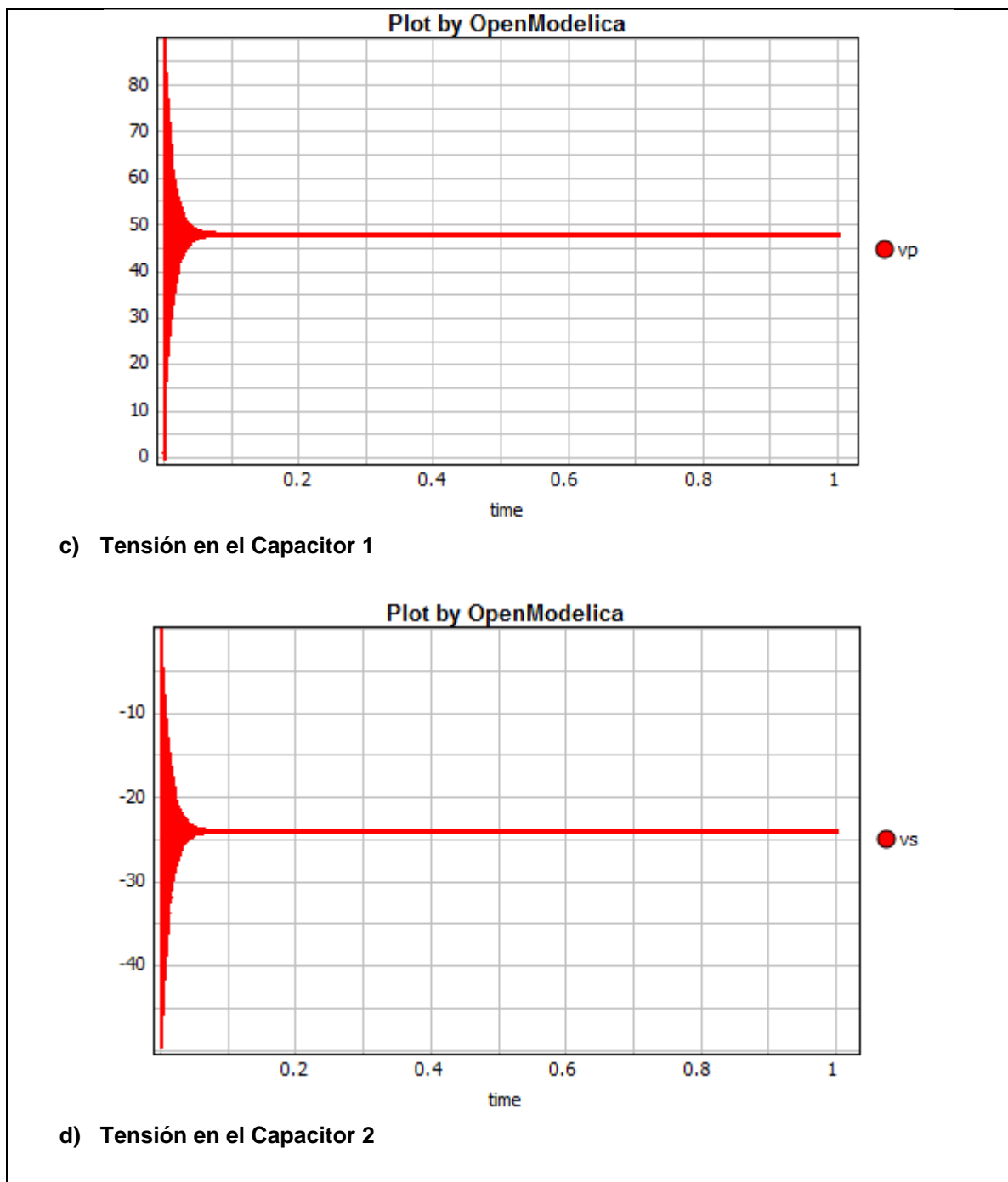
Se puede observar en la Figura. 3.27 que la tensión de salida obtenida de este conversor es invertida, es decir con polaridad opuesta a la tensión aplicada a la entrada. A diferencia del convertidor buck-boost, el convertidor cuk presenta dos inductores y dos capacitores, las señales de estos están presentes en las señales resultantes. Para las gráficas se observa la existencia de sobreimpulsos durante el estado transitorio de la señal. Sin embargo, se puede observar que la



corriente obtenida en los inductores es próxima a cero, lo cual podría llevar a modos de conducción discontinua del circuito.

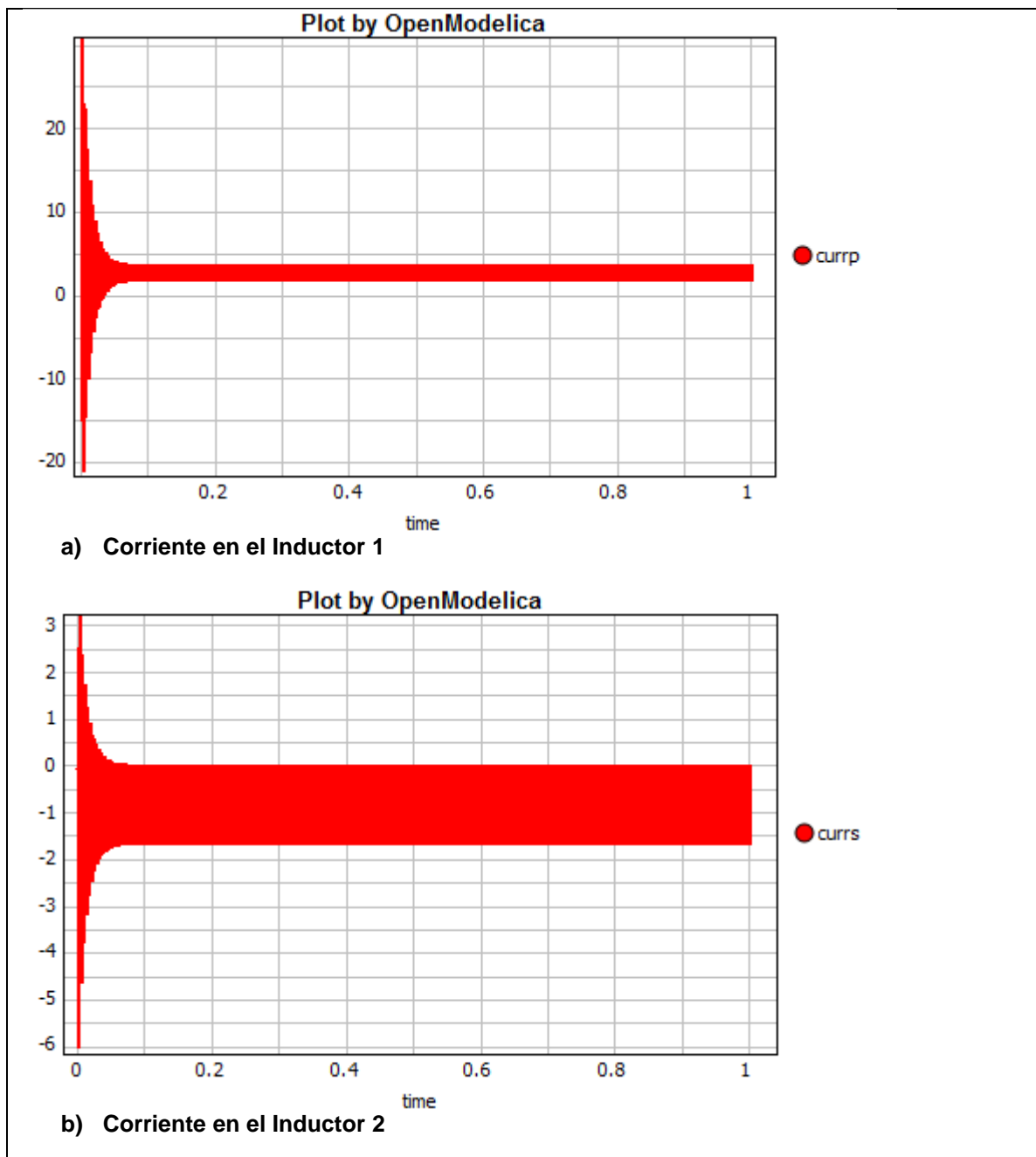
Se observa además, que el voltaje obtenido en el capacitor de entrada es mayor que la tensión aplicada al circuito y de polaridad positiva aproximadamente 36V, mientras que el capacitor de salida la polaridad es contraria y el valor obtenido es el deseado 12V y el rizado obtenido se encuentra dentro del rango deseado ya que el obtenido es 0.3% para el voltaje de salida y 0.8% para la tensión presente en el capacitor de entrada.



Figura. 3. 28. Respuesta Conversor Tipo Cuk  $\delta=0.5$ 

En la Figura. 3.28 se observa que la tensión de salida cuando el valor de  $\delta=0.5$  es igual que la tensión de entrada aproximadamente  $-24V$ , presentando de igual manera sobreimpulsos durante el estado transitorio de la señal. Así mismo, se observa que el voltaje de salida es negativo, de polaridad opuesta a la tensión de entrada.

La tensión presente en el capacitor de entrada ha aumentado a un valor de 49V y el valor máximo de los picos presentes en las señales ha aumentado con relación a los obtenidos con un  $\delta$  menor. De igual manera los valores de las corrientes de las bobinas se aproximan a cero.



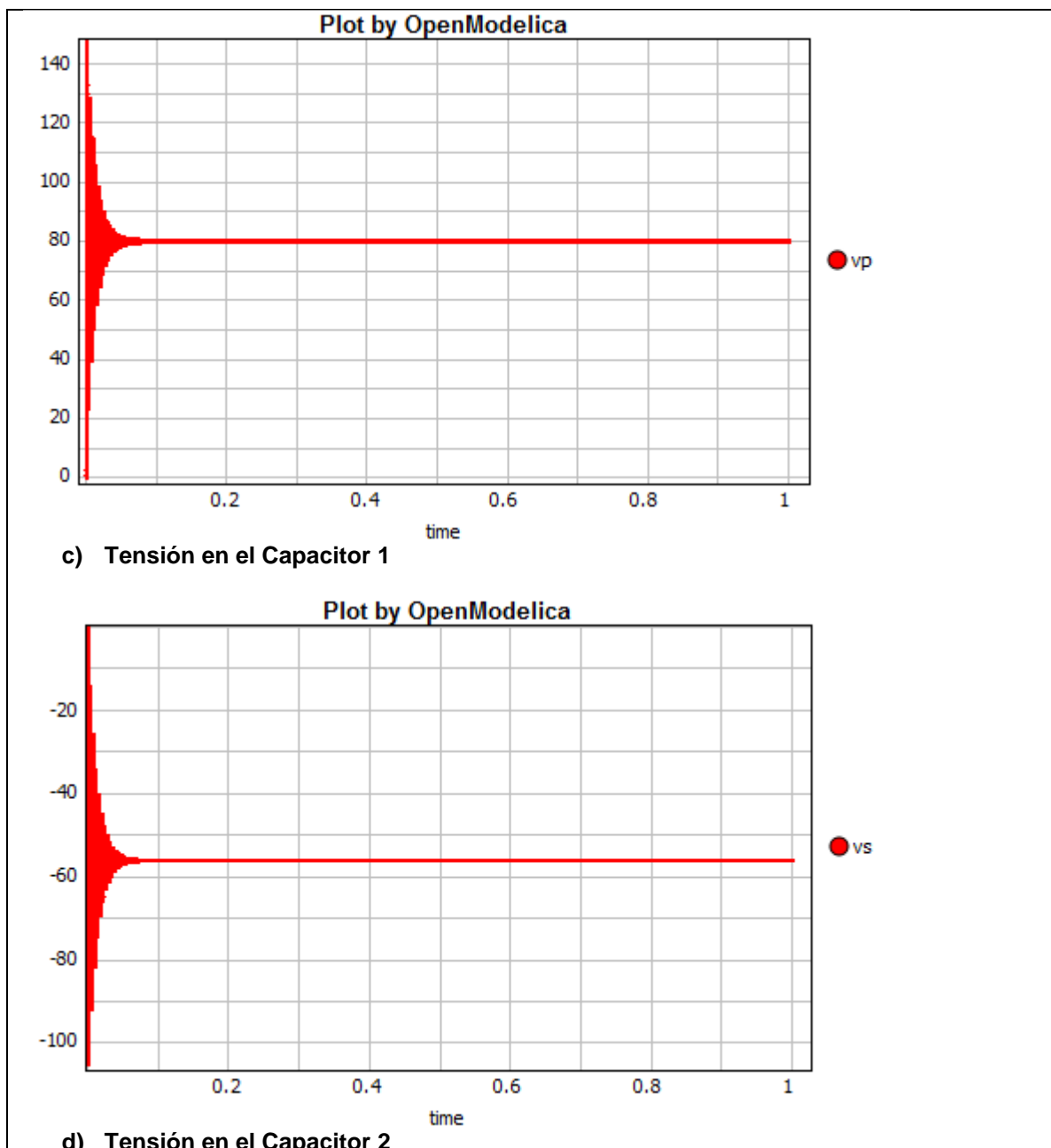


Figura. 3. 29. Respuesta Conversor Tipo Cuk  $\delta=0.7$

Como se puede observar en la Figura. 3.29 la tensión de salida en el convertidor cuk cuando  $\delta = 0.7$  es mayor a la tensión de entrada y de igual forma se presenta de polaridad opuesta a la de la tensión de entrada. A diferencia de la respuesta obtenida en el convertidor buck-boost, el convertidor cuk continúa presentando sobre impulsos incluso en este caso que la tensión de salida es mayor.

El voltaje en el capacitor de entrada ha aumentado a 80V. Mientras la corriente en el inductor 1 ha aumentado, la corriente que circula por el inductor 2 ha disminuido, no obstante estas variaciones no son demasiado grandes.

Se puede observar en los resultados obtenidos para el conversor cuk que la tensión de salida es mayor o menor a la tensión de entrada de acuerdo al valor de  $\delta$  como el conversor buck-boost. Si el valor de este parámetro es menor a 0.5 e, la tensión de salida será menor a la tensión de entrada, caso contrario, si el valor de  $\delta$  es mayor a 0.5 la tensión de salida del circuito será mayor a la tensión aplicada al mismo, y si el valor dado a  $\delta$  iguala a 0.5 el valor obtenido a la salida es el valor de tensión que se aplicó a la entrada.

Una desventaja de este convertidor con respecto al buck-boost es que presenta mayor cantidad de elementos es decir más inductores y capacitores, lo cual dificulta su construcción.

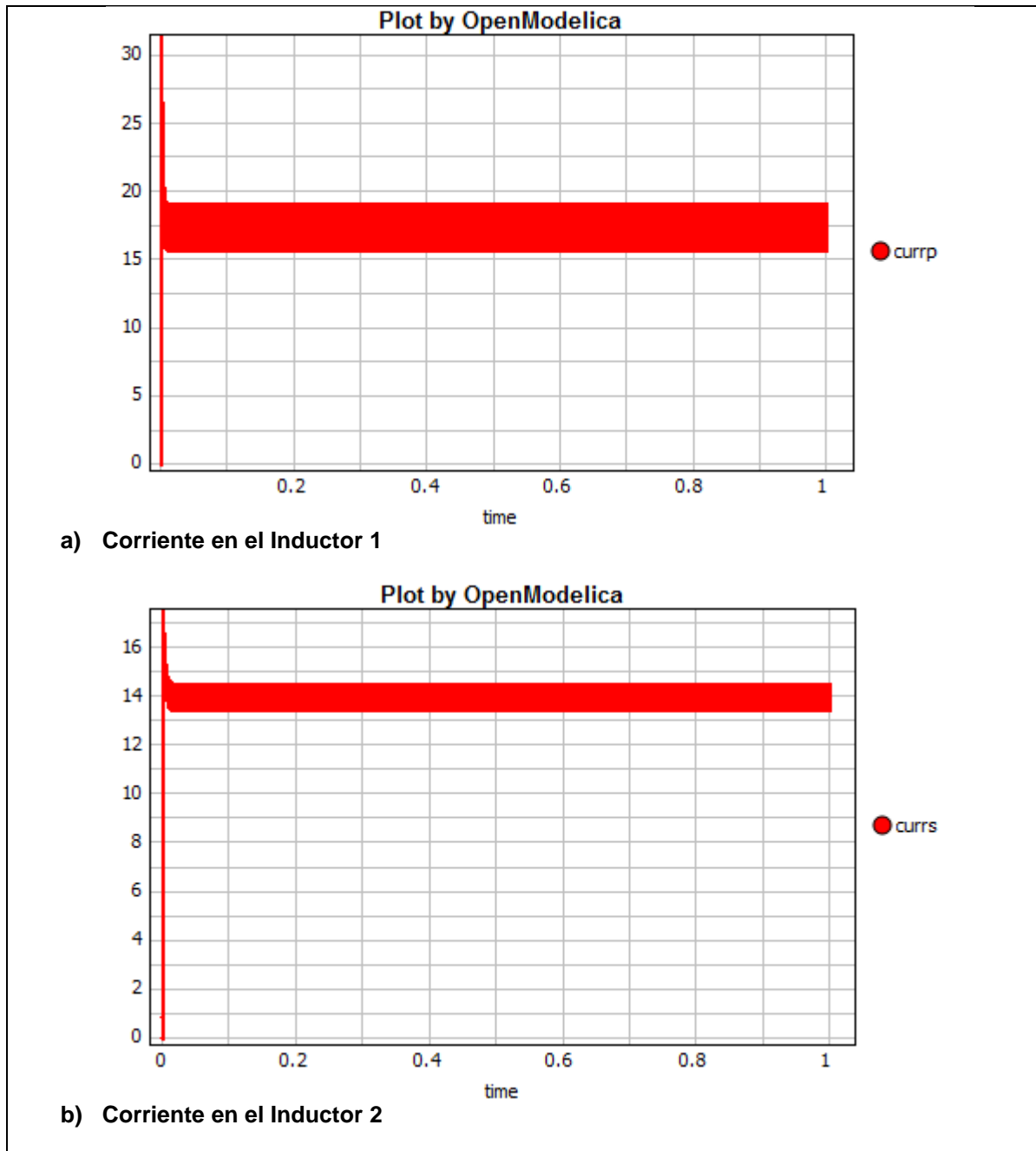
### 3.2.5 Simulación Conversor Tipo Sepic

Para la simulación y los cálculos respectivos del conversor Sepic se ha tomado en cuenta los siguientes parámetros:

- Tensión de Entrada: 24 V
- Tensión de salida: 12 V
- Frecuencia de Trabajo: 20 KHz
- Corriente de Salida: 11 A
- Rizado de Tensión de salida 1%
- Rizado de la corriente 40%

Se utiliza para la simulación un valor de  $0.178mH$  para los inductores,  $10\mu F$  para el capacitor de entrada y  $4.7mF$  para el valor del capacitor de salida.

El código utilizado en OpenModelica para la simulación de este conversor se encuentra en el Anexo 10.



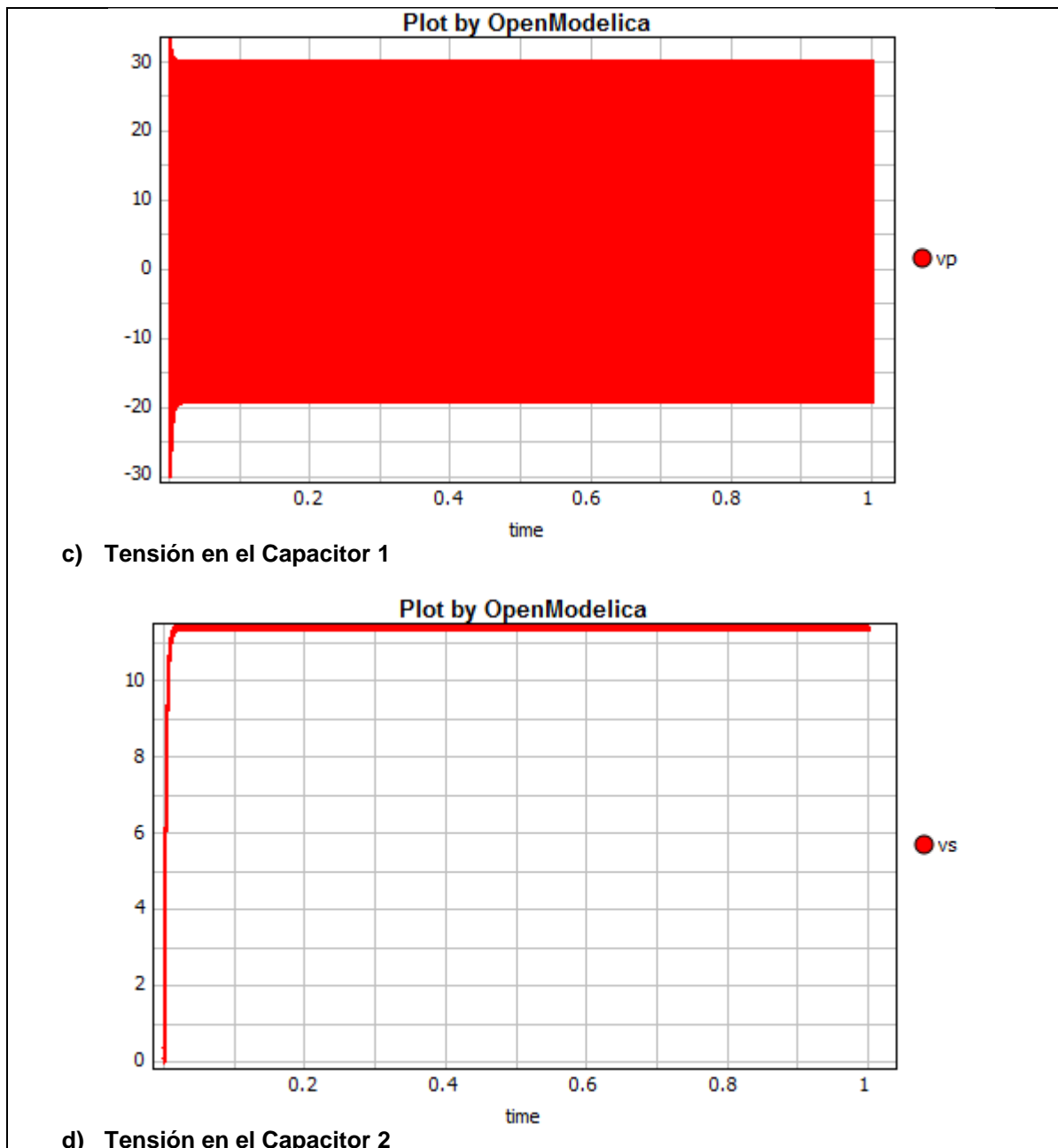


Figura. 3. 30. Respuesta Convertor Tipo Sepic  $\delta=0.34$

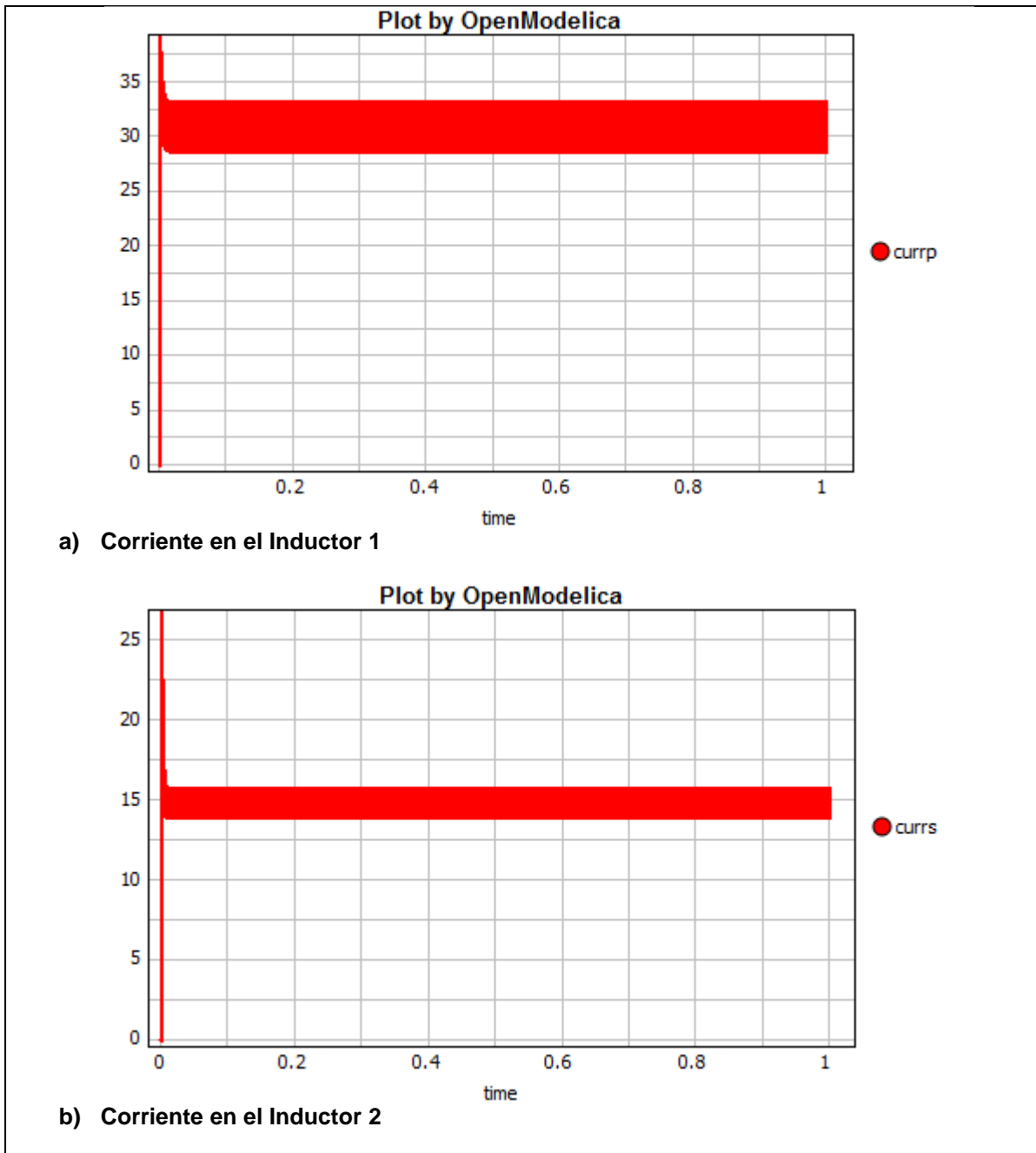
Se puede observar en la Figura. 3.30 que la tensión de salida obtenida de este convertor, a diferencia del buck-boost y del cuk, tiene la misma polaridad de la tensión de entrada. De igual forma que el cuk, el convertor Sepic necesita de dos inductores y dos capacitores, cuyas respuestas se encuentran en las figuras de las señales resultantes.

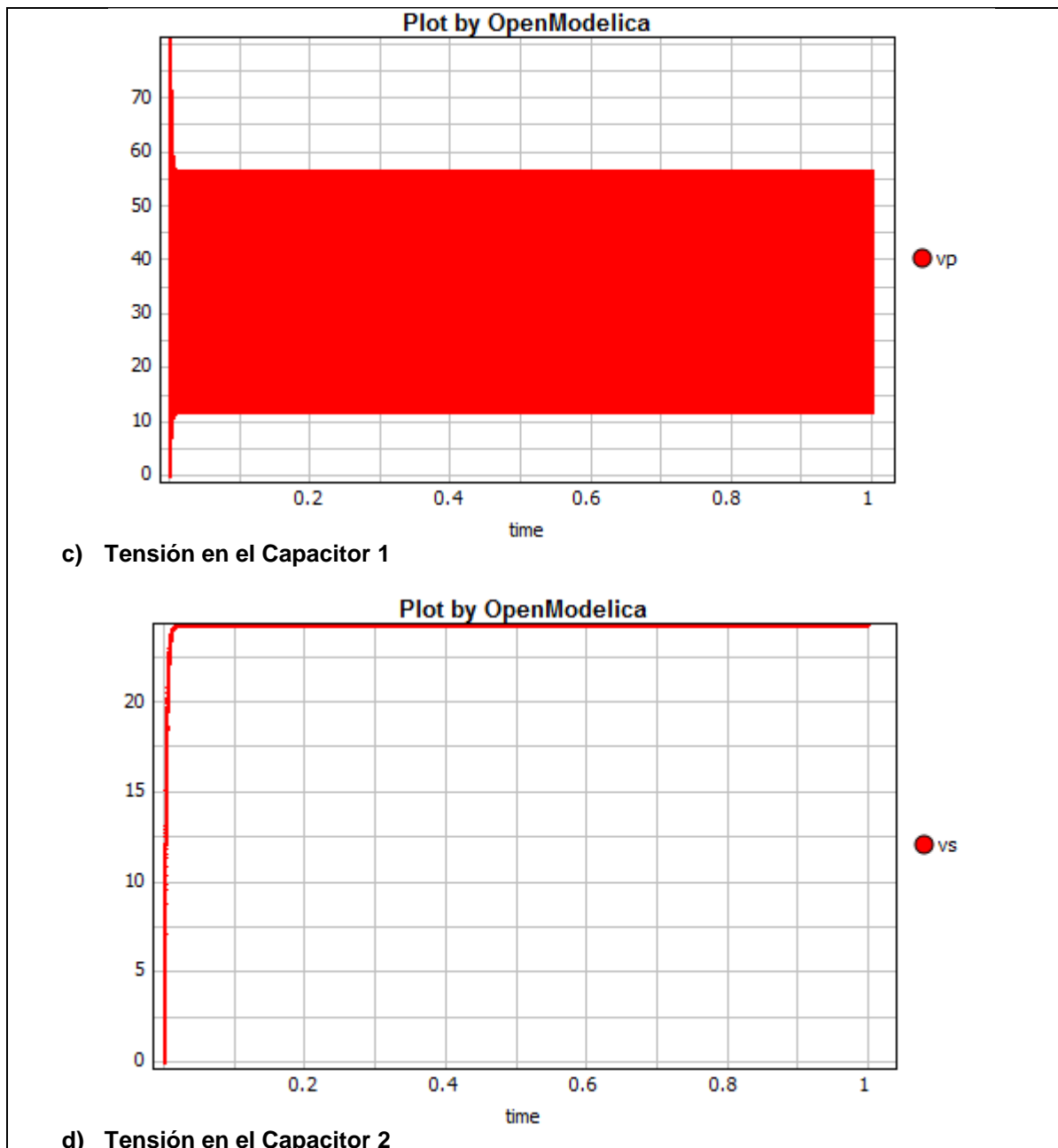
De igual manera que los convertidores anteriores se puede observar que para las gráficas se observa la existencia de sobreimpulsos durante el estado transitorio de la señal. Sin embargo, las variaciones de corriente se presentan, en el inductor 1 se puede observar que la corriente oscila entre 15 y 20A mientras que en el inductor 2 ésta varía entre 13 y 15A. La variación de voltaje presente en el capacitor 1 es demasiado amplia, esta recorre desde -20 a 30V. Estas respuestas nos presentan que el convertidor trabaja con una corriente pulsante pero a pesar de esto, el voltaje en la salida es el esperado 12V y con un rizado de 0.8%.

En la Figura. 3.31 se observa que la tensión de salida cuando el valor de  $\delta=0.5$  es igual que la tensión de entrada aproximadamente 24V. El rizado de la tensión de salida durante el estado estable cumple el valor requerido de 1%.

La corriente presente en los inductores es aproximadamente la misma con un valor promedio de 25A de igual forma, varía desde los 15 a 32A. La tensión presente en el capacitor de entrada ha aumentado a un valor de 70V de sobreimpulso y sigue presentando una variación extremadamente grande desde 10 a 55V. El valor máximo de los picos presentes en las señales ha aumentado con relación a los obtenidos con un  $\delta$  menor.







**Figura. 3. 31. Respuesta Convertor Tipo Sepic  $\delta=0.5$**

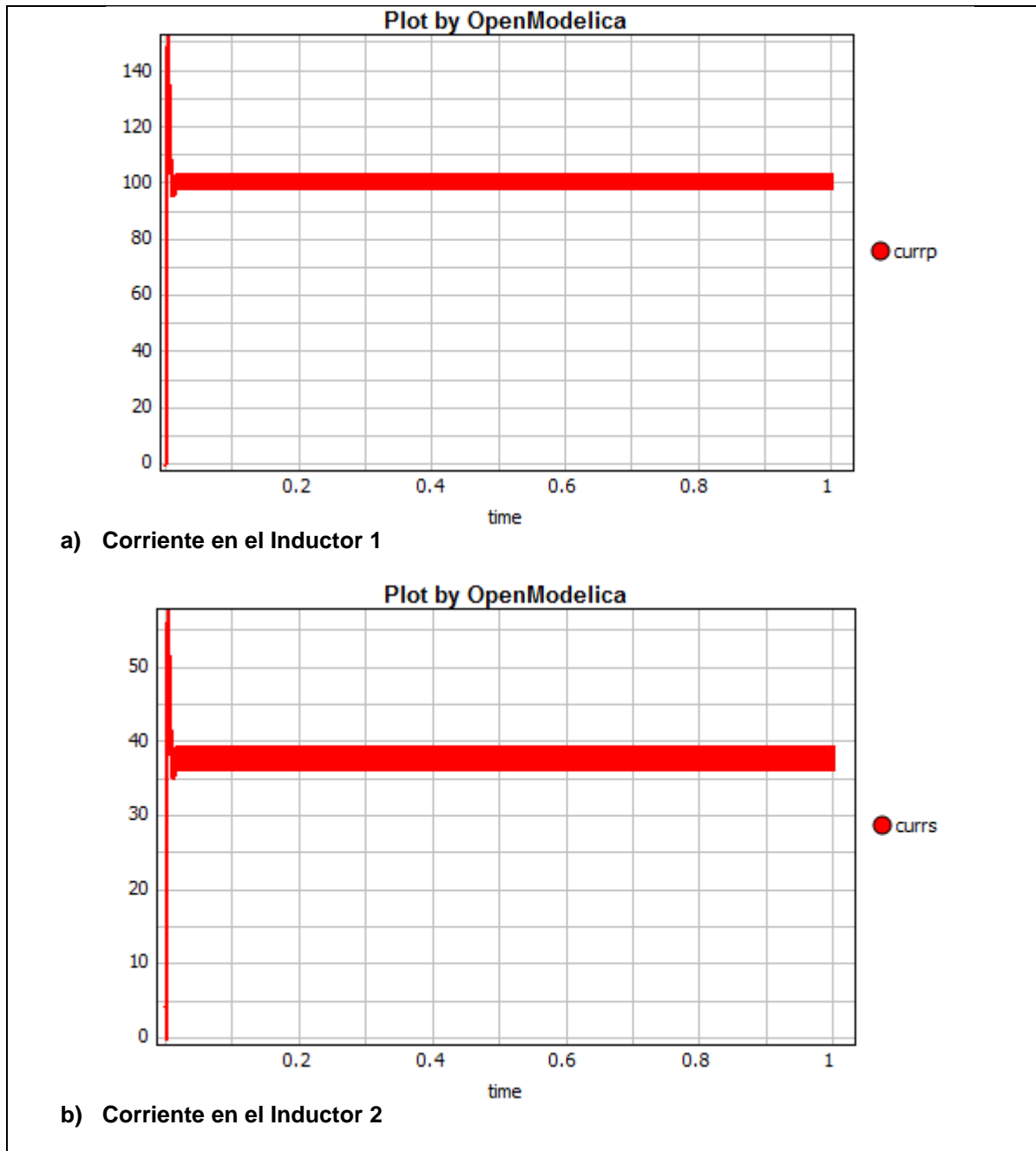
Como se puede observar en la Figura. 3.32 la tensión de salida en el convertidor sepic cuando  $\delta = 0.7$  es mayor a la tensión de entrada llegando a los 57V. El rizado presente en la señal de salida cumple con la condición inicial del 1%.

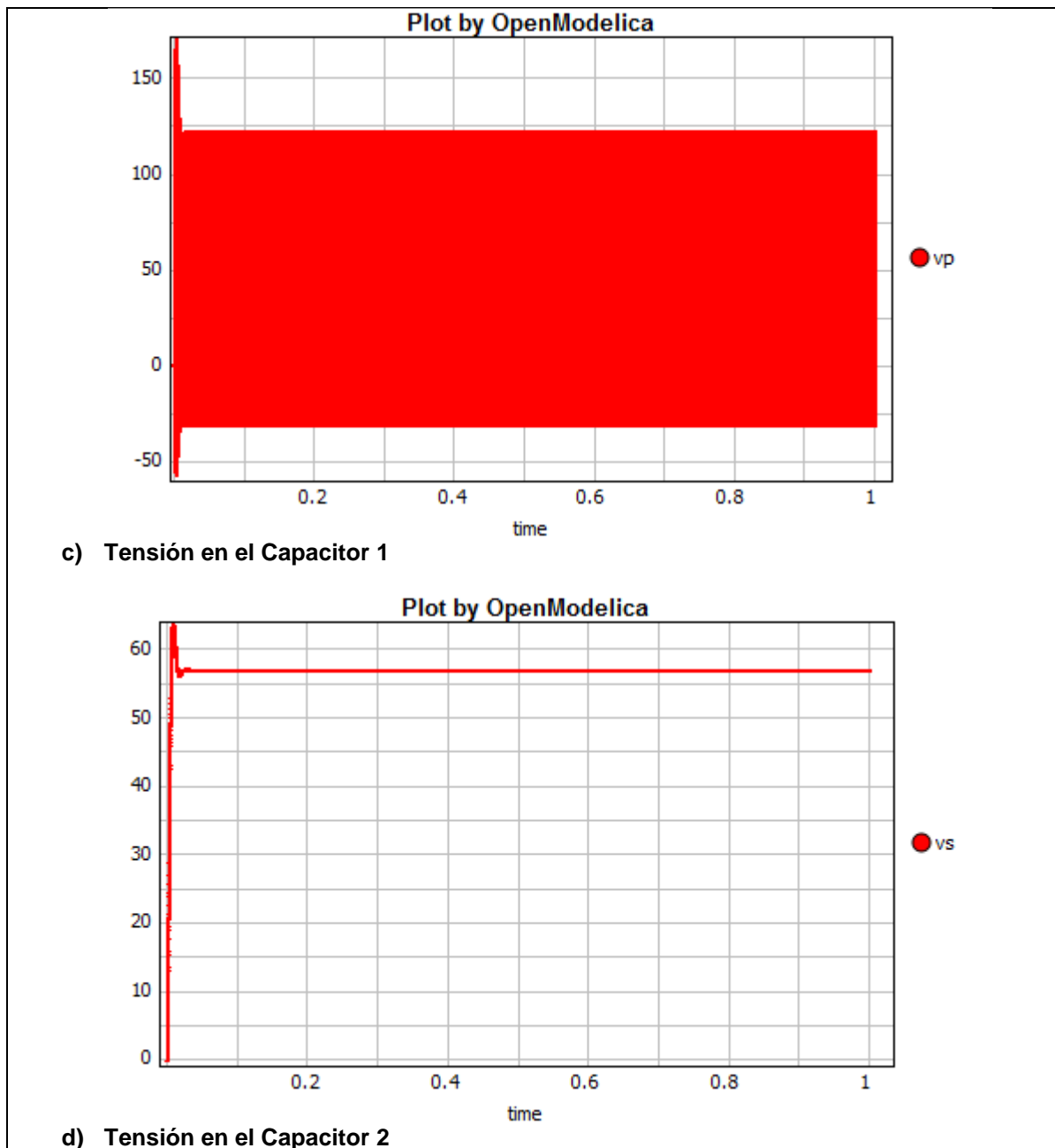
El voltaje en el capacitor de entrada ha aumentado estableciéndose entre los -50 y 100V, es decir continua con una variación extremadamente grande. Por otro lado la corriente del inductor 1 ha aumentado considerablemente, sin embargo el

rango de variación ha disminuido. La corriente del inductor 2 ha aumentado pero no de manera extrema como la que atraviesa el inductor 1.

Se puede observar en los resultados obtenidos para el conversor sepic que la tensión de salida es mayor o menor a la tensión de entrada de acuerdo al valor de  $\delta$  de igual manera que en los conversores buck-boost y cuk. Si el valor de este parámetro es menor a 0.5, la tensión de salida será menor a la tensión de entrada, caso contrario, si el valor de  $\delta$  es mayor a 0.5 la tensión de salida del circuito será mayor a la tensión aplicada al mismo, y si el valor dado a  $\delta$  iguala a 0.5 el valor obtenido a la salida es el valor de tensión que se aplicó a la entrada.

De la misma manera que el conversor Cuk, la desventaja de este convertidor es la cantidad de elementos que se necesita para su construcción es decir dos inductores y dos capacitores, lo cual dificulta su construcción. Sin embargo la diferencia que presenta con respecto al Cuk es la tensión no invertida que presenta a la salida y la corriente pulsatoria con la que trabaja.



Figura. 3. 32. Respuesta Conversor Tipo Sepic  $\delta=0.7$ 

### 3.3. PROPUESTA DE CONVERTIDOR OPTIMIZADO

Para el trabajo de la optimización se ha optado por utilizar el convertor tipo Sepic, en este punto se buscará determinar una fórmula que permita determinar la potencia de disipación del convertidor en función a la frecuencia con la que trabaja el mismo.

Para optimizar el modelo del convertidor sepic se incluirá en el estudio del mismo las resistencias presentes tanto en los inductores como en los capacitores, estas resistencias influirán en el funcionamiento del mismo por lo cual se presentará nuevamente un modelo matemático que incluya dichas resistencias.

El convertidor dc-dc tipo sepic se muestra en la Figura. 3.33. en dicha figura se puede observar que las resistencias presentes en los capacitores así como en los inductores han sido incluidas.

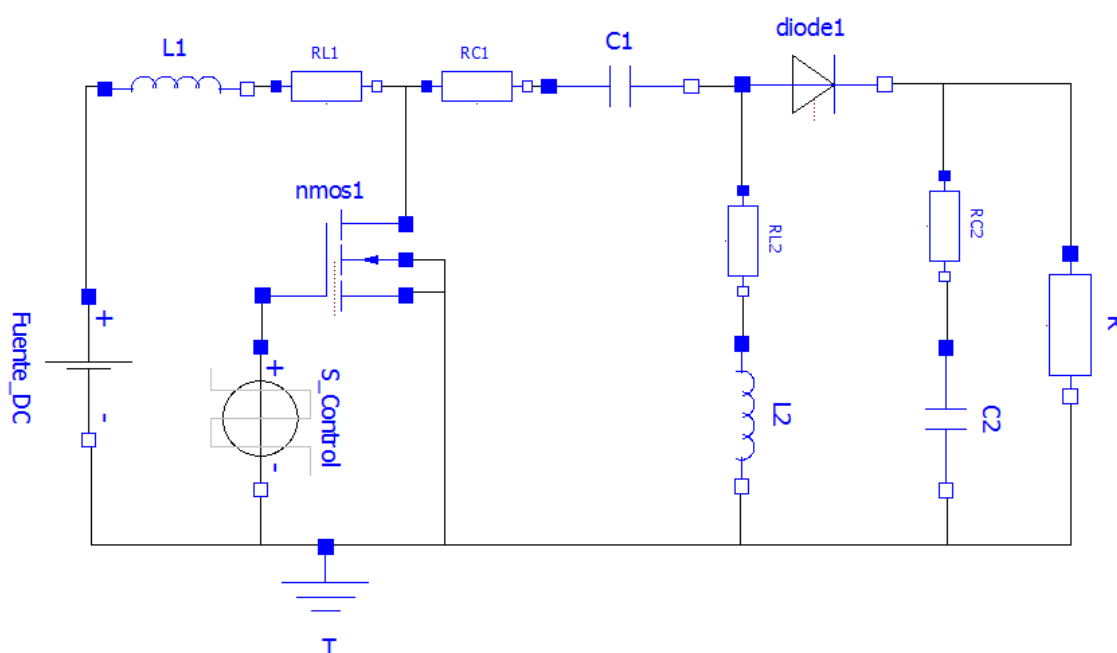


Figura. 3. 33. Convertidor Sepic incluido resistencias parásitas

Para el modelamiento matemático del convertidor se considerará la posición del interruptor (estado del transistor), de ésta manera se establece que el valor de  $u=1$  representa al interruptor en posición cerrada y que el valor de  $u=0$  representa al interruptor en posición abierta.

Se comenzará por determinar las ecuaciones cuando el interruptor este en la posición cerrada, es decir que el mismo este conduciendo se aplica ahora la ley de voltajes y corrientes de Kirchoff al circuito, de esta manera se obtienen las ecuaciones (3.8), (3.9), (3.10) y (3.11).

$$L1 \frac{di_{L1}}{dt} = Vi - R_{L1}(i_{L1}) \quad (3.8)$$

$$L2 \frac{di_{L2}}{dt} = V_{C1} - (R_{C1} + R_{L2})i_{L2} \quad (3.9)$$

$$C1 \frac{dv_{C1}}{dt} = -i_{L2} \quad (3.10)$$

$$C2 \frac{dv_{C2}}{dt} = -\frac{V_{C2}}{R + R_{C2}} \quad (3.11)$$

Donde:

$V_i$ : Voltaje de entrada al convertor

$V_{C2}$ : Voltaje en el capacitor 2

$V_{C1}$ : Voltaje en el capacitor 1

$i_{L1}$ : Corriente en el inductor 1

$i_{L2}$ : Corriente en el inductor 2

$R$ : Carga del convertor (Resistiva)

$R_{L1}$ : Resistencia presente en el inductor 1

$R_{L2}$ : Resistencia presente en el inductor 2

$R_{C1}$ : Resistencia presente en el capacitor 1

$R_{C2}$ : Resistencia presente en el capacitor 2

Sin embargo, cuando el interruptor cambia de posición, es posible describir el sistema de acuerdo a las ecuaciones. (3.12), (3.13), (3.14) y (3.15)

$$L1 \frac{di_{L1}}{dt} = -\left(\frac{R}{R + R_{C2}}\right)V_{C2} - \left(\frac{R \times R_{C2}}{R + R_{C2}}\right)i_{L2} - V_{C1} - \left(R_{L1} + R_{C1} + \frac{R \times R_{C2}}{R + R_{C2}}\right)i_{L1} + V_i \quad (3.12)$$

$$L2 \frac{di_{L2}}{dt} = - \left( \frac{R}{R + R_{C2}} \right) V_{C2} - \left( R_{L2} + \frac{R \times R_{C2}}{R + R_{C2}} \right) i_{L2} - \left( \frac{R \times R_{C2}}{R + R_{C2}} \right) i_{L1} \quad (3.13)$$

$$C1 \frac{dv_{C1}}{dt} = i_{L1} \quad (3.14)$$

$$C2 \frac{dv_{C2}}{dt} = - \frac{V_{C2}}{R + R_{C2}} + \left( \frac{R}{R + R_{C2}} \right) i_{L2} + \frac{1}{R + R_{C2}} i_{L1} \quad (3.15)$$

Haciendo uso del valor que se asigno a  $u$  dependiendo la posición en la que se encuentre el interruptor, se puede obtener una expresión para el modelo de convertidor esto es representado en las ecuaciones (3.16), (3.17), (3.18) y (3.19).

$$L1 \frac{di_{L1}}{dt} = -(1-u) \left( \left( \frac{R}{R + R_{C2}} \right) V_{C2} + \left( \frac{R \times R_{C2}}{R + R_{C2}} \right) i_{L2} + V_{C1} \right) + Vt - \left( R_{L1} + (1-u) \left( R_{C1} + \frac{R \times R_{C2}}{R + R_{C2}} \right) \right) i_{L1} \quad (3.16)$$

$$L2 \frac{di_{L2}}{dt} = u(- (R_{C1} + R_{L2}) i_{L2}) - (1-u) \left( \left( \frac{R}{R + R_{C2}} \right) V_{C2} + \left( \frac{R \times R_{C2}}{R + R_{C2}} \right) i_{L1} + \left( R_{L2} + \frac{R \times R_{C2}}{R + R_{C2}} \right) i_{L2} \right) \quad (3.17)$$

$$C1 \frac{dv_{C1}}{dt} = (1-u) i_{L1} - u i_{L2} \quad (3.18)$$

$$C2 \frac{dv_{C2}}{dt} = - \frac{V_{C2}}{R + R_{C2}} + (1-u) \left( \left( \frac{R}{R + R_{C2}} \right) i_{L2} + \frac{1}{R + R_{C2}} i_{L1} \right) \quad (3.19)$$



Ahora bien, para el modo de conducción discontinuo hace falta el modelamiento del convertidor cuando el interruptor está abierto y el diodo no conduce de este modo se obtienen las ecuaciones (3.20), (3.21), (3.22) y (3.23).

$$\frac{di_{L1}}{dt} = -\frac{V_{C1}}{L1 + L2} + \frac{Vi}{L1 + L2} - (R_{L1} + R_{L2} + R_{C1})\frac{i_{L1}}{L1 + L2} \quad (3.20)$$

$$\frac{di_{L2}}{dt} = \frac{V_{C1}}{L1 + L2} - \frac{Vi}{L1 + L2} - (R_{L1} + R_{L2} + R_{C1})\frac{i_{L2}}{L1 + L2} \quad (3.21)$$

$$C1 \frac{dv_{C1}}{dt} = -i_{L2} + i_{L1} \quad (3.22)$$

$$C2 \frac{dv_{C2}}{dt} = -\frac{V_{C2}}{R + R_{C2}} \quad (3.23)$$

Ahora bien, para el cálculo de la potencia disipada por el semiconductor, se parte de las curvas características del mosfet. Sin embargo debido a la topología del conversor, es decir a la existencia del inductor L1, existe un desfaseamiento entre el voltaje y corriente en el mismo. Este ángulo de desfaseamiento se calcula con la ayuda del inductor L1. Las curvas características utilizadas para determinar la fórmula de la potencia disipada en el semiconductor, se pueden observar en la Figura. 3. 34. En la figura se puede observar el desfaseamiento entre el voltaje y la corriente representado por la letra a, con lo cual se distingue que la corriente Id se retrasa con respecto al voltaje, se distingue además que el valor mínimo del voltaje Vds es igual al voltaje de saturación aproximadamente 0.6 V a diferencia de la tensión nula que se presenta en el modelo ideal.

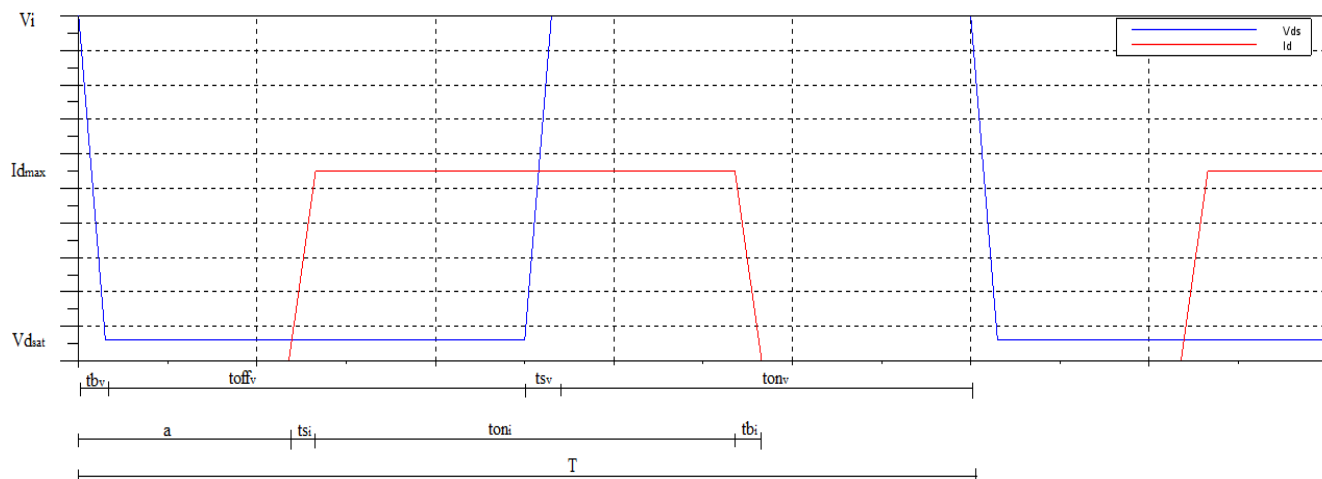


Figura. 3.34. Curvas Características de Corriente y Voltaje del semiconductor

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T Vds(t) Id(t) dt$$

$$P = \frac{1}{T} \int_a^{a+ts_i} Vds(t) Id(t) dt + \int_{a+ts_i}^{tofv+tbv} Vds(t) Id(t) dt + \int_{tofv+tbv}^{tofv+tbv+tsv} Vds(t) Id(t) dt + \int_{tofv+tbv+tsv}^{a+ts_i+ton_i} Vds(t) Id(t) dt + \int_{a+ts_i+ton_i}^{a+ts_i+ton_i+tb_i} Vds(t) Id(t) dt$$

$$P1 = \int_a^{ts_i+a} V_{DSat} \left( \frac{I_{Dmax}}{ts_i} (t) \right) dt$$

$$P1 = V_{DSat} \int_a^{ts_i+a} \frac{I_{Dmax}}{ts_i} (t) dt$$

$$P1 = V_{DSat} \frac{I_{Dmax}}{ts_i} \left( \frac{ts_i^2}{2} \right)$$

$$P1 = V_{DSat} \frac{I_{Dmax}}{2} (ts_i)$$

$$P2 = \int_{ts_i+a}^{toff_v+tb_v} V_{DSat} \cdot I_{Dmax} dt$$

$$P2 = V_{DSat} \cdot I_{Dmax} (toff_v + tb_v - (ts_i + a))$$

$$P2 = V_{DSat} \cdot I_{Dmax} (toff_v + tb_v - ts_i + a)$$

$$P3 = \int_{toff_v+tb_v}^{toff_v+tb_v+ts_v} \left( \frac{V_{DSat} - Vi}{-ts_v} (t - toff_v - tb_v - ts_v) + Vi \right) I_{Dmax} dt$$

$$P3 = I_{Dmax} \left[ \frac{V_{DSat} - Vi}{-ts_v} \cdot \frac{ts_v^2}{2} - \frac{V_{DSat} - Vi}{-ts_v} ts_v \cdot (toff_v + tb_v) - \frac{V_{DSat} - Vi}{-ts_v} \cdot ts_v^2 + Vi(ts_v) \right]$$

$$P3 = I_{Dmax} \left[ \frac{V_{DSat} - Vi}{ts_v} \cdot \frac{ts_v^2}{2} + \frac{V_{DSat} - Vi}{ts_v} ts_v \cdot (toff_v + tb_v) + Vi(ts_v) \right]$$

$$P3 = I_{Dmax} \left[ (V_{DSat} - Vi) \left( toff_v + tb_v + \frac{ts_v}{2} \right) + Vi \cdot ts_v \right]$$

$$P4 = \int_{toff_v+tb_v+ts_v}^{a+ts_i+ton_i} V_i \cdot I_{Dmax} dt$$

$$P4 = V_i \cdot I_{Dmax} (a + ts_i + ton_i - toff_v - tb_v - ts_v)$$

$$P5 = \int_{a+ts_i+ton_i}^{a+ts_i+ton_i+tb_i} V_i \left( \frac{I_{Dmax}}{-tb_i} (t - ts_i - ton_i - tb_i) \right) dt$$

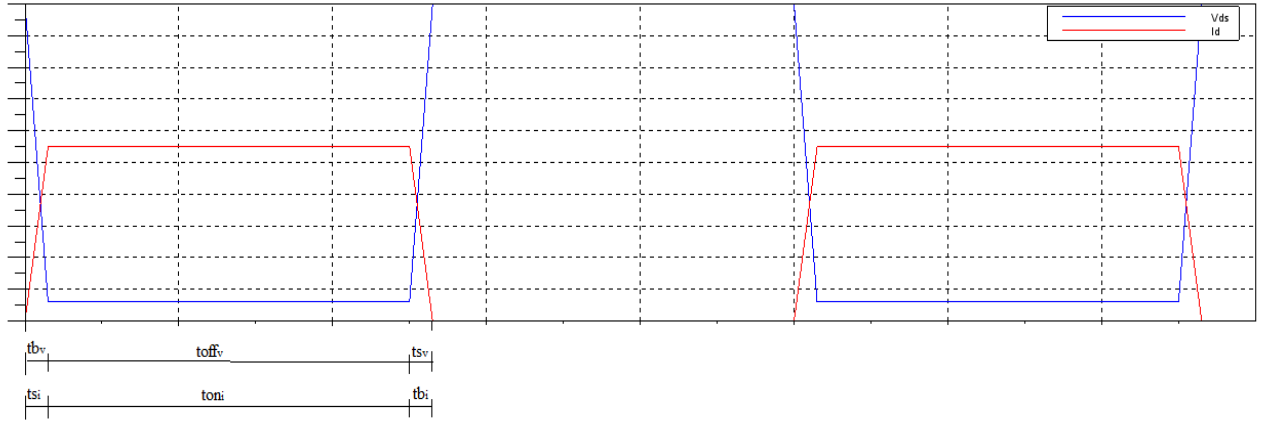
$$P5 = -\frac{Vi I_{Dmax}}{tb_i} \int_{a+ts_i+ton_i}^{a+ts_i+ton_i+tb_i} (t - ts_i - ton_i - tb_i) dt$$

$$P5 = -\frac{Vi I_{Dmax}}{tb_i} \left( \frac{tb_i^2}{2} - tb_i(ts_i + ton_i + tb_i) \right)$$

$$P5 = \frac{Vi I_{Dmax}}{tb_i} \left( \frac{tb_i^2}{2} + tb_i(ts_i + ton_i) \right)$$

$$P = \frac{1}{T} (P1 + P2 + P3 + P4 + P5)$$

$$P = \frac{1}{T} \cdot I_{Dmax} \left[ \frac{V_{DSat}}{2} (ts_i) + V_{DSat} (toff_v + tb_v - ts_i + a) + (V_{DSat} - Vi) \left( toff_v + tb_v + \frac{ts_v}{2} \right) + Vi \cdot ts_v + V_i(a + ts_i + ton_i - toff_v - tb_v - ts_v) + \frac{Vi}{tb_i} \left( \frac{tb_i^2}{2} + tb_i(ts_i + ton_i) \right) \right]$$



**Figura. 3. 35. Curvas Características del Mosfet. Funcionamiento Ideal**

Partiendo de las curvas características del mosfet en su funcionamiento ideal mostradas en la Figura.3.35, es posible asumir que  $ts_i=tb_v$  y  $tb_i=ts_v$ , debido a que en el modelo del convertor sepic la corriente sufre un desfase pero su forma de onda no varía. Así mismo, es posible asumir que  $ton_i=toff_v$

Reemplazando  $ts_i=tb_v$  y  $tb_i=ts_v$ , se tendrá:

$$P = \frac{1}{T} \cdot I_{Dmax} \left[ \frac{V_{DSat}}{2} (ts_i) + V_{DSat} (toff_v + ts_i - ts_i + a) + (V_{DSat} - Vi) \left( toff_v + ts_i + \frac{tb_i}{2} \right) + Vi \cdot tb_i + Vi (a + ts_i + ton_i - toff_v - ts_i - tb_i) + \frac{Vi}{tb_i} \left( \frac{tb_i^2}{2} + tb_i (ts_i + ton_i) \right) \right]$$

$$P = \frac{1}{T} \cdot I_{Dmax} \left[ \frac{V_{DSat}}{2} (ts_i) + V_{DSat} (toff_v + a) + (V_{DSat} - Vi) \left( toff_v + ts_i + \frac{tb_i}{2} \right) + Vi \cdot tb_i + Vi (a + ton_i - toff_v - tb_i) + \frac{Vi}{tb_i} \left( \frac{tb_i^2}{2} + tb_i (ts_i + ton_i) \right) \right]$$

$$P = \frac{1}{T} \cdot I_{Dmax} \left[ \frac{V_{DSat}}{2} (ts_i) + V_{DSat}(toff_v + a) + V_{DSat} \left( toff_v + ts_i + \frac{tb_i}{2} \right) - Vi \left( toff_v + ts_i + \frac{tb_i}{2} \right) + Vi \cdot tb_i + Vi(a + ton_i - toff_v - tb_i) + Vi \left( \frac{tb_i}{2} + ts_i + ton_i \right) \right]$$

$$P = \frac{1}{T} \cdot I_{Dmax} \left[ V_{DSat} \left( 2toff_v + \frac{3}{2}ts_i + \frac{tb_i}{2} + a \right) + Vi(a + 2 \cdot ton_i - 2toff_v) \right]$$

Reemplazando  $ton_i=toff_v$  se tiene:

$$P = \frac{1}{T} \cdot I_{Dmax} \left[ V_{DSat} \left( 2 \cdot ton_i + \frac{3}{2}ts_i + \frac{tb_i}{2} + a \right) + Vi(a) \right] \quad (3. 24)$$

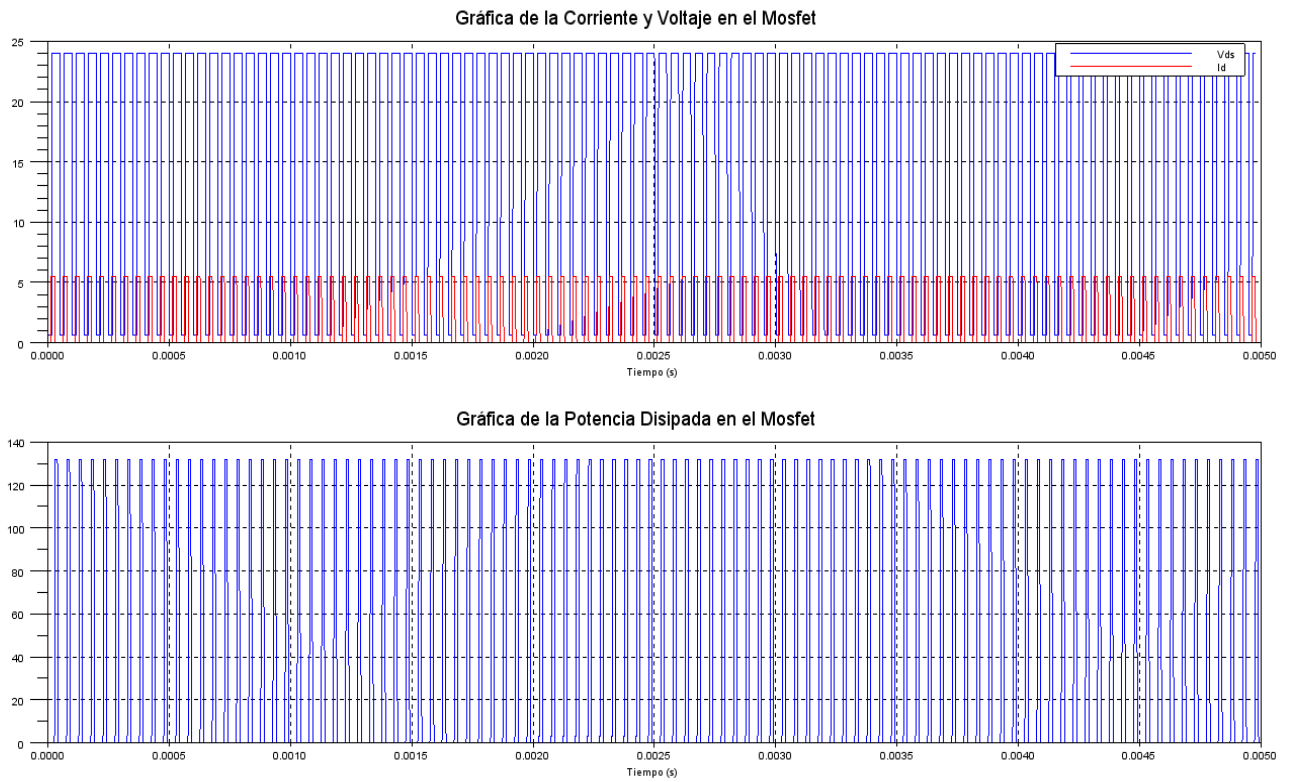
Esta ecuación 3.24 permitirá determinar la potencia disipada por el semiconductor en el convertor tipo Sepic. Cabe recalcar que dicha fórmula es descrita para un ciclo de trabajo ( $\delta$ ) mayor a 0.25 y menor a 0.75.

Se debe además, calcular la potencia disipada por los inductores y capacitores del circuito debido a la resistencia presentes en estos elementos, en el circuito se ha incluido dichas resistencias.

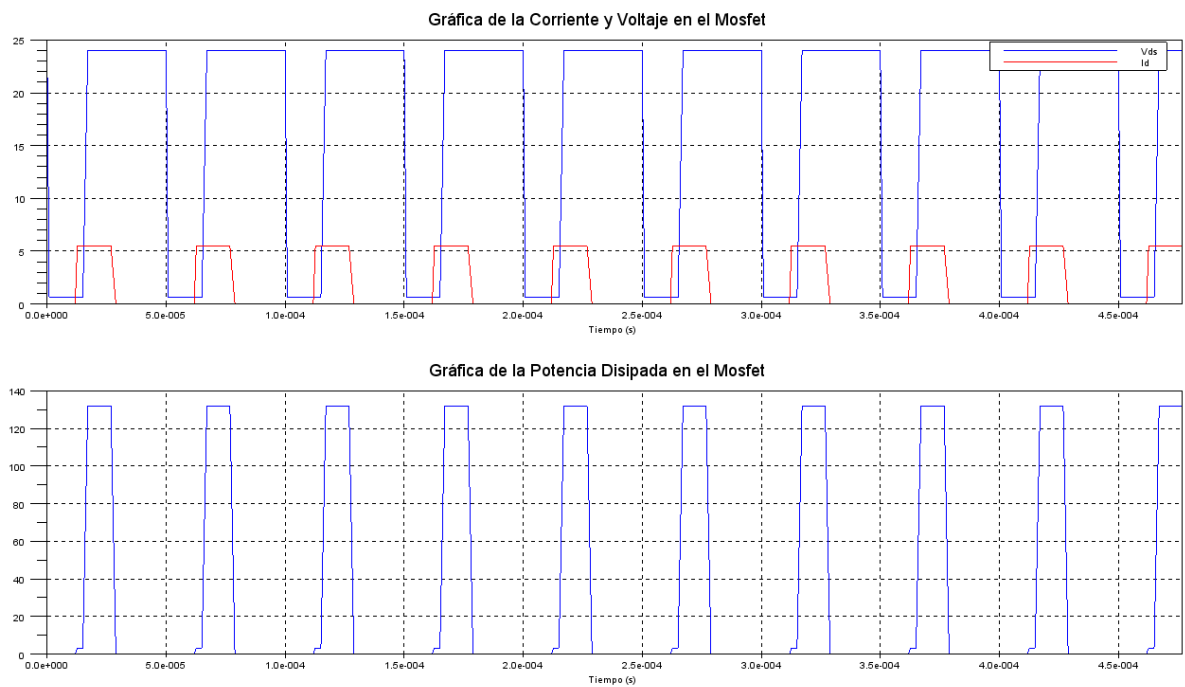
### 3.3.1 Simulaciones

En la Figura. 3.36 y 3.37 se puede observar las respuestas que se obtiene del mosfet, tanto de voltaje como de corriente que atraviesa por el mismo. De igual manera se puede observar la potencia disipada por el elemento, partiendo de que potencia= $V \cdot I$ .

El código utilizado para la simulación de la respuesta del semiconductor (mosfet), se lo puede encontrar en el Anexo 11.



**Figura. 3. 36. Respuesta del Mosfet**



**Figura. 3. 37. Respuesta Amplificada del Mosfet**

En la Figura 3.37 se puede observar de mejor manera la respuesta del mosfet, en la misma se observa pulsos de voltaje y corriente, los mismos que están desfazados, para calcular éste ángulo de desfazamiento se hace uso de la ecuación 3.25 con el valor obtenido para el inductor anteriormente encontrado y con el valor de la resistencia presente en dicho inductor, se obtiene un ángulo de 87.4° para éste caso.

$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{\omega L_1}{R_{L1}} \right) \quad (3.25)$$

Donde:

$\omega L_1$ : Impedancia del inductor 1 ( $\omega = 2\pi f$ )

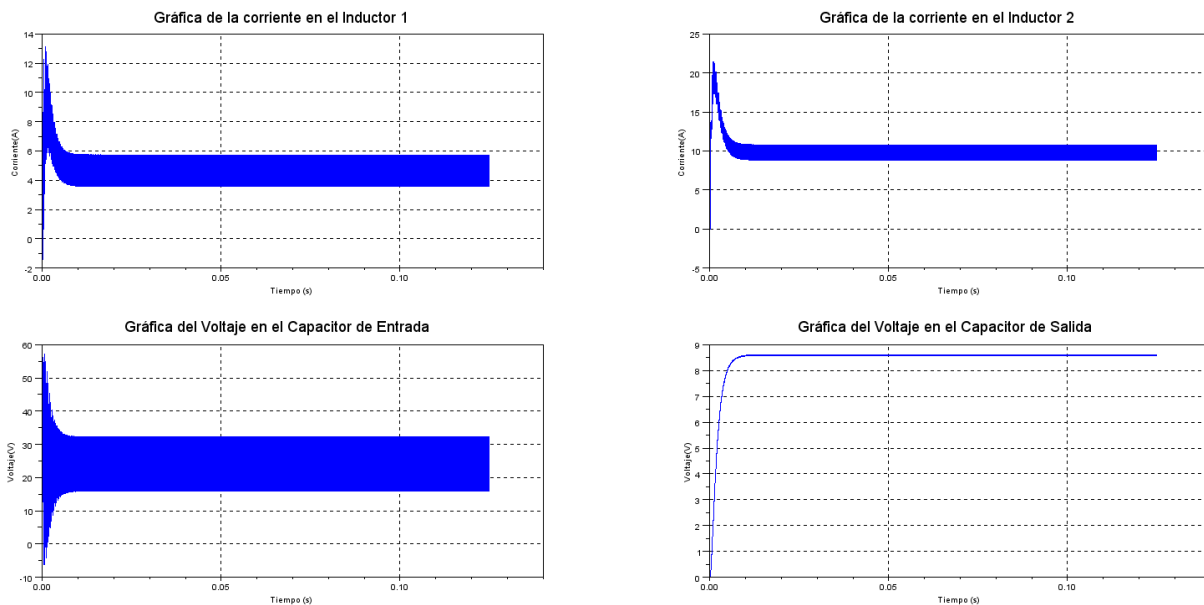
$R_{L1}$ : Resistencia presente en el inductor 1

El voltaje máximo presente en el semiconductor es de 24V mientras que el mínimo presente es de 0.6V. La corriente en color rojo toma un valor máximo de 5.5 A, es decir aproximadamente el mismo valor que atraviesa por el inductor, y a diferencia del voltaje este si llega un valor de 0A en el punto mínimo.

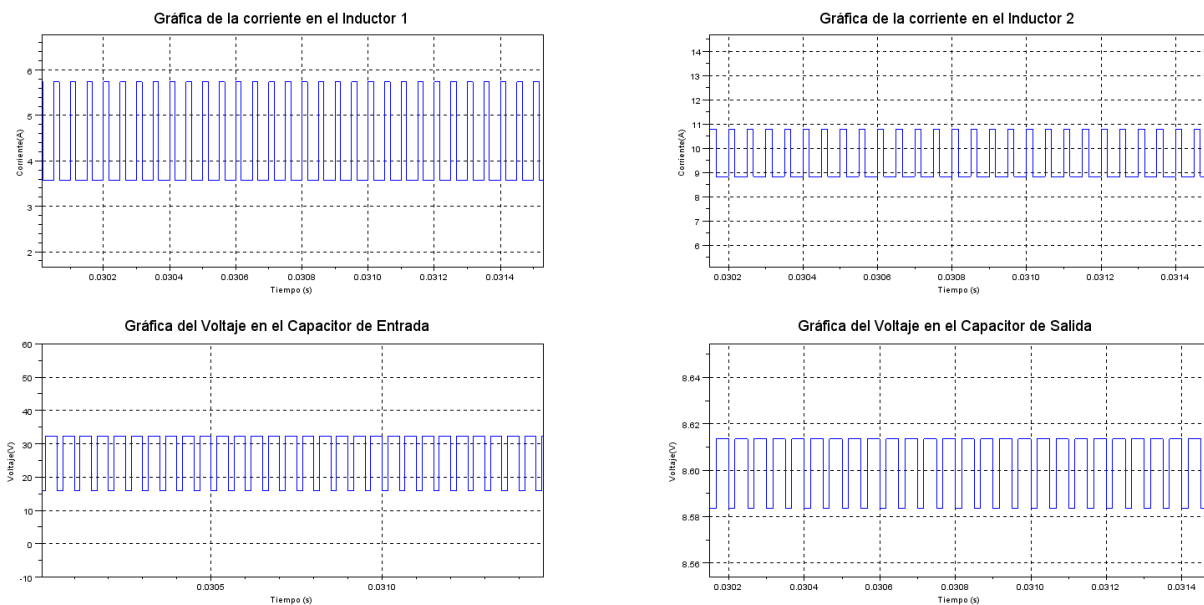
La potencia disipada por el elemento, se consigue gracias a la multiplicación de la tensión y corriente presente en el semiconductor, como se puede apreciar, la potencia viene dada como un pico en cada período llegando éste al valor de 130W.

El código utilizado para la simulación del circuito sepic se encuentra en el Anexo 12.





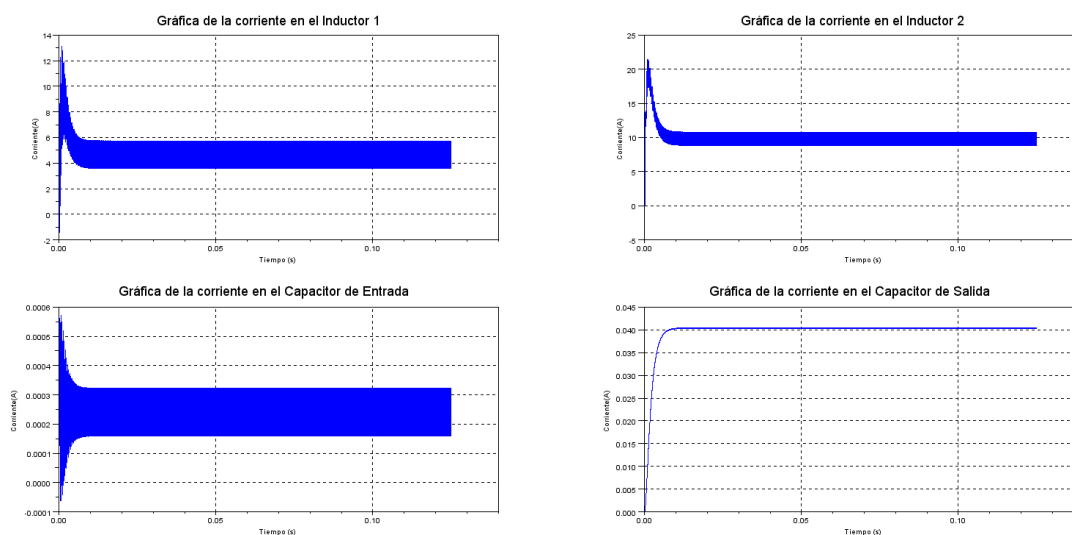
**Figura. 3. 38. Respuesta Conversor Sepic. Modelo Real**



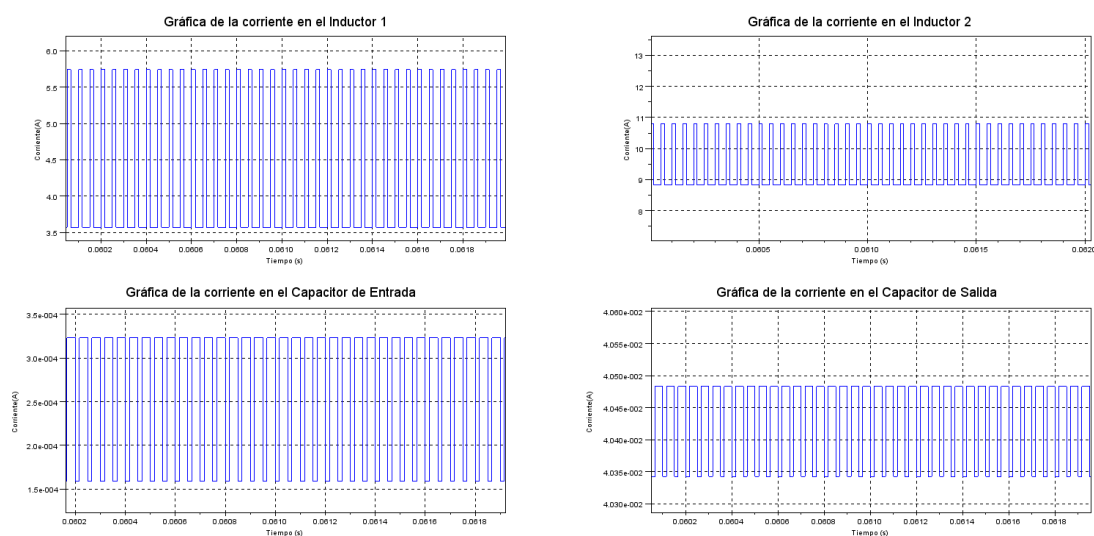
**Figura. 3. 39. Ampliación Respuesta Conversor Sepic. Modelo Real**

En la Figura 3.38 y 3.39 se puede observar la respuesta del conversor Sepic como modelo real, es decir incluidas las resistencias presentes en los inductores y los capacitores. Se puede observar de esta manera que la respuesta a la salida del conversor no presenta ningún pico de voltaje, sin embargo el valor obtenido a la salida está por debajo del valor deseado, éste valor obtenido es de 8.60V

consiguiendo de esta manera un rendimiento de 73% en el convertidor. La corriente media presente en el inductor 1 es aproximadamente 5A mientras que la presente en el inductor 2 es de 10A.



**Figura. 3. 40. Corrientes de todos los elementos del Convertor Sepic**



**Figura. 3. 41. Corrientes Ampliadas de todos los elementos del Convertor Sepic**

En la Figura 3.40 y 3.41 se puede observar las corrientes que atraviesan por cada uno de los elementos del circuito del convertidor, de esta manera se puede observar como se dijo anteriormente que la corriente que atraviesa por el inductor 1 es de aproximadamente 5A mientras que la presente en el inductor 2 es de 10A. Mientras que las corrientes que atraviesan por el capacitor de salida es de 40mA.

## **CAPITULO IV**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **4.1 CONCLUSIONES.**

Este documento ha permitido analizar el funcionamiento de los convertidores de potencia DC-DC, mediante el uso de dos simuladores gratuitos como son: OpenModelica y Scilab.

Mediante éste documento se pudo comprobar la importancia de los simuladores, se podría decir que son herramientas indispensables para el estudio de algún sistema o circuito, en éste caso para el estudio de los convertidores de potencia dc-dc.

Se realizó un estudio a fondo del convertidor Sepic, lo cual ayudó presentar una ecuación para determinar la potencia de disipación del mismo. Para lograr esto, se determinó la potencia disipada por el semiconductor a partir de las curvas características del mismo.

En las señales resultantes obtenidas se puede observar que todos estos circuitos presentan sobreimpulsos en la tensión de salida del circuito, esto presenta inconvenientes al momento de las aplicaciones por lo cual se debería utilizar una señal de control realimentada para evitar tener estos picos de tensión que pueden ser perjudiciales para las cargas.

Se pudo observar que el software OpenModelica, es un simulador muy versátil, que permite trabajar no solo con modelos eléctricos, sino también con modelos hidráulicos, mecánicos, entre otros. Sin embargo, éste presenta fallas al trabajar con algunas librerías de modélica en el editor gráfico.

Las simulaciones de OpenModelica fueron realizadas utilizando el editor de ecuaciones o en el OMS (Open MModelicaShell) para evitar errores presentes en el editor gráfico.

Se pudo observar que Scilab es un programa que posee gran similitud al simulador comercial Matlab, de hecho es posible transformar programas realizados en Matlab a Scilab, con un conversor que viene integrado en el programa, por lo cual se lo puede reemplazar en algunas aplicaciones.

El XCos de Scilab que es el equivalente a Simulink de Matlab trabaja con modelos de la librería de Modelica, sin embargo el tiempo de procesamiento en modelos realizados utilizando ésta herramienta es demasiado alto, por lo cual se optó por trabajar únicamente mediante código de programación.

Si bien se ha trabajado en ambos simuladores con línea de comandos, al ver los códigos utilizados en los diferentes simuladores, se puede concluir que la programación utilizada en OpenModelica es más corta y sencilla. Esto se debe por una parte a que se utilizó una librería de modélica para la creación de la señal cuadrada y por otro lado a que el lenguaje utilizado es específico para trabajar con ecuaciones matemáticas lo cual simplifica la programación.

Para la resolución de las ecuaciones diferenciales utilizadas para modelar los convertidores de potencia, se utilizó el comando ode en scilab, mientras que en Openmodelica no es necesario hacer esto, basta con determinar las ecuaciones y el momento de ejecutar la simulación, éstas se resolverán automáticamente.

Mediante el uso de dos simuladores distintos se pudo demostrar el modo de funcionamiento y las respuestas que se obtienen en cada uno de los convertidores de potencia dc-dc.

## 4.2 RECOMENDACIONES

Se recomienda profundizar el estudio de los simuladores OpenModelica y Scilab, ya que, al ser estos programas gratuitos, pueden ser utilizados en la universidad reemplazando otros simuladores comerciales.

Para trabajar con el simulador OpenModelica, se recomienda utilizar la plataforma Os x o Linux debido a que en el sistema operativo Windows este programa demora demasiado en ejecutar los comandos sobretodo en procesar las graficas resultantes.

Se recomienda abrir únicamente una ventana del simulador OpenModelica y verificar no exista más que un proceso de omc.exe y OMShell.exe, caso contrario los procesos tardaran mas en realizarse.

Antes de trabajar con alguna librería modélica, se recomienda verificar que esta funcione correctamente.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Mohan, Ned, *First Course on Power Electronics and Drives*, edición 2003
- [2] Rashid, Muhammad, *Electrónica de Potencia*, Tercera edición, 2004
- [3] Mohan, Ned, Undeland, Tore, Robbins, William, *Electrónica de Potencia-convertidores, aplicaciones y diseño*, Tercera edición
- [4] Casaravilla, Chaer R., "Simulador Didáctico de Circuitos de Electrónica de Potencia", <http://www3.euitt.upm.es/taee/Congresosv2/1994/papers/1994S1D05.pdf>
- [5] <http://cde05.etsi.urv.es/pub/pdf/197pub.pdf>
- [6] [http://tec.upc.es/el/TEMA-1%20EP%20\(v1\).pdf](http://tec.upc.es/el/TEMA-1%20EP%20(v1).pdf)
- [7] <http://ie.fing.edu.uy/ense/asign/elpot1/dcdc.pdf>
- [8] <http://www.uv.es/~esanchis/sea/pdf/tema3-SEA-03.PDF>
- [9] Sira-Ramírez, Hebertt, Silva-Ortigoza, Ramón, "Control Design Techniques in Power Electronics Devices", [http://iecon02.us.es/~leopoldo/Store/tsp\\_14.pdf](http://iecon02.us.es/~leopoldo/Store/tsp_14.pdf)
- [10] [http://www.ate.uniovi.es/ribas/Docencia04\\_05/Electronica\\_de\\_Potencia\\_12750/Presentaciones/Leccion11\\_Conversion\\_CC-CC\\_sin\\_aislamiento.pdf](http://www.ate.uniovi.es/ribas/Docencia04_05/Electronica_de_Potencia_12750/Presentaciones/Leccion11_Conversion_CC-CC_sin_aislamiento.pdf)
- [11] <http://cde05.etsi.urv.es/pub/pdf/1498pub.pdf>
- [12] [http://tec.upc.es/ep/CLASE\\_CC-CC.pdf](http://tec.upc.es/ep/CLASE_CC-CC.pdf)
- [13] <http://metis.umh.es/jacarrasco/docencia/ep/Tema3/DCDC.pdf>
- [14] [http://pels.edv.uniovi.es/pels/pels/Pdf/Tesis/Tesis\\_Jesus\\_Oliver.pdf](http://pels.edv.uniovi.es/pels/pels/Pdf/Tesis/Tesis_Jesus_Oliver.pdf)
- [15] [http://tec.upc.es/el/TEMA-4%20EP%20\(v1\).pdf](http://tec.upc.es/el/TEMA-4%20EP%20(v1).pdf)
- [16] <http://personalpages.manchester.ac.uk/staff/Manuela.Bujorianu/Modelica.pdf>
- [17] [www.rm-mechatronics.com/Modelica\\_Presentation.pptx](http://www.rm-mechatronics.com/Modelica_Presentation.pptx)

- [18] Furic, Sébastien, "Using Modelica under Scilab/Scicos ",  
<http://www.scicos.org/ScicosModelica/Formation/Documentation/Introduction%20to%20Modelica.pdf>
- [19]Fritzson, Peter, "Principles of Object Oriented Modeling and Simulation with Modelica 2.1", <http://www.ida.liu.se/~pelab/modelica/OpenModelica/Documents/ModelicaTutorialFritzson.pdf>
- [20]Mora Escobar, Héctor Manuel, "Introducción a SCILAB",  
<http://dmi.uib.es/~antonioe/datos/manual.pdf>
- [21]<http://www.scilab.org/support/documentation/tutorials>
- [22]<http://www.ti.com/lit/an/slyt309/slyt309.pdf>
- [23]<http://www.ti.com/lit/an/snva168d/snva168d.pdf>
- [24] [www.ate.uniovi.es/sebastian/S\\_E.../Leccion%204%20MOSFET.pp](http://www.ate.uniovi.es/sebastian/S_E.../Leccion%204%20MOSFET.pp)
- [25] *Eladio Durán Aranda, "Prototipo experimental para la medida y caracterización de las curvas I-V y P-V de módulos y Arrays FVs : diseño, modelado, implementación y pruebas",*  
<http://rabida.uhu.es/dspace/bitstream/handle/10272/2960/b15613665.pdf?sequence=1>
- [26] Ariza T, Miguel., Luna C, Ivan, h"*Diseño e Implementación de un sistemas de alimentación eficiente y robusto para suministro de energía de un Picosatelite tipo cubesat*", [http://www.laccei.org/LACCEI2007-Mexico/Papers%20PDF/ED190\\_ArizaT.pdf](http://www.laccei.org/LACCEI2007-Mexico/Papers%20PDF/ED190_ArizaT.pdf)
- [27]<http://www.maxim-ic.com/app-notes/index.mvp/id/1051>
- [28][http://www.ate.uniovi.es/ribas/Docencia04\\_05/Electronica\\_de\\_Potencia\\_12750/Presentaciones/Leccion11\\_Conversion\\_CC-CC\\_sin\\_aislamiento.pdf](http://www.ate.uniovi.es/ribas/Docencia04_05/Electronica_de_Potencia_12750/Presentaciones/Leccion11_Conversion_CC-CC_sin_aislamiento.pdf)
- [29]<http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/91053b.pdf>
- [30]<http://www.switchingpowermagazine.com/downloads/Sepic%20Analysis.pdf>

## FECHA DE ENTREGA

El proyecto fue entregado al Departamento de Eléctrica y Electrónica y reposa en la Escuela Politécnica del Ejército desde:

Sangolquí, \_\_\_\_\_ del 2012.

ELABORADO POR:

---

Stefany Carolina Garzón Muñoz  
172109638-4

AUTORIDAD:

---

Ing. Victor Proaño  
Coordinador de la Carrera de Ingeniería en Electrónica,  
Automatización y Control