



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CELAYA

**DEPARTAMENTO DE
INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

***“CONVERTIDOR CD/CD MULTIENTRADA,
BASADO EN FLYBACK, CON
APLICACIONES EN ENERGÍA RENOVABLE”***

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO
DE MAESTRO EN CIENCIAS EN
INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

P R E S E N T A

ING. GABRIELA LARA SALAZAR

DIRECTOR DE TESIS

DR. NIMROD VÁZQUEZ NAVA

CO-DIRECTOR DE TESIS

DR. JAIME ARAU ROFFIEL

CELAYA, GTO., MÉXICO, JUNIO 2017

Agradecimientos

A mi mamá, +Susy: por todo...

A mi papá, Pedro: por haberme recordado de lo que estoy hecha cuando lo olvidé.

A mi compañero de vida, Gerardo: por esta travesía que decidimos emprender juntos hace ya 15 años.

Al Dr. José Manuel: Por su amor, respaldo incondicional, por su guía, consejos y por siempre creer en nosotros.

A mi asesor Nimrod: por su enorme paciencia para conmigo en estos dos años y medio de aprendizaje constante, por sus consejos, por su conocimiento, por tanto apoyo, y sobre todo por su increíble pasión por la investigación y docencia.

A Lilys, Claudia, Neto, Ricardo: Por formar parte de mi vida de aquí en adelante.

Al Instituto Tecnológico de Celaya: por acogerme como una más de sus hijas.

Al CONACYT, por su invaluable apoyo económico para llevar a término este trabajo de tesis.

| | |
|--|----|
| i. INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| ii. ABSTRACT..... | 4 |
| Capítulo 1. Estado del Arte..... | 8 |
| 1.1 Resúmen..... | 9 |
| 1.2 Energía renovable..... | 9 |
| 1.2.1 Energía solar..... | 9 |
| 1.2.2 Panel fotovoltaico..... | 9 |
| 1.3 Sistemas convertidores de potencia..... | 11 |
| 1.4 Topologías del estado del arte para sistemas renovables..... | 12 |
| 1.4.1 Convertidor CD/CD de tres puertos para sistema fotovoltaico independiente..... | 12 |
| 1.4.2 Convertidor CD/CD de dos entradas aplicable en fuentes de energía .. limpia..... | 13 |
| 1.4.3 Novedoso sistema de suministro de energía con corrección del factor de potencia..... | 14 |
| 1.4.4 Convertidor elevador de múltiples entradas para baja potencia..... | 14 |
| 1.4.5 Convertidor CD/CD de múltiples salidas basado en el convertidor ... Flyback..... | 15 |
| 1.4.6 Cargador integrado de baterías con corrección del factor de potencia..... | 16 |
| 1.5 Propuesta de tesis..... | 17 |
| Capítulo 2. Topología Propuesta..... | 18 |
| 2.1 Resúmen..... | 19 |
| 2.2 Topología propuesta..... | 19 |
| 2.3 Modos de operación el convertidor propuesto..... | 20 |
| 2.3.1 Modo de operación 1..... | 20 |
| 2.3.2 Modo de operación 2..... | 21 |
| 2.3.3 Modo de operación 3..... | 21 |
| 2.4. Diseño del control para regular el voltaje de salida del convertidor propuesto..... | 22 |
| 2.4.1 Análisis para el control del voltaje de salida, modo de operación 1..... | 23 |
| 2.4.2 Análisis para el control del voltaje de salida, modo de operación 2..... | 34 |
| 2.4.3 Análisis para el control del voltaje de salida, modo de operación 3..... | 41 |

| | |
|--|-----------|
| 2.5 Diseño del convertidor propuesto..... | 54 |
| Capítulo 3. Simulaciones y Resultados Experimentales | 56 |
| 3.1 Resumen..... | 57 |
| 3.2 Simulación de la planta propuesta | 57 |
| 3.2.1 Simulación del modo de operación 1 | 57 |
| 3.2.2. Simulación del modo de operación 2 | 58 |
| 3.2.3. Simulación del modo de operación 3 | 59 |
| 3.3 Resultados experimentales en lazo abierto..... | 60 |
| 3.3.1 Prueba a lazo abierto, modo de operación 1.a: V_{s1} entrega energía a la carga | 64 |
| 3.3.2 Prueba a lazo abierto, modo de operación 2.a: V_{s2} entrega energía a la carga | 68 |
| 3.3.3 Prueba a lazo abierto, modo de operación 3.a: V_{Bat} entrega energía a la carga | 72 |
| iii. CONCLUSIONES | 76 |
| iv. REFERENCIAS | 79 |

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES Y TABLAS

| | |
|---|-----------|
| Ilustración 1 - Curva típica de un panel fotovoltaico [3]. | 11 |
| Ilustración 2 - Convertidor CD/CD de tres puertos para sistema fotovoltaico independiente [4]. | 13 |
| Ilustración 3 - Convertidor CD/CD de dos entradas aplicable en fuentes de energía limpia [5]..... | 13 |
| Ilustración 4 - Sistema de suministro de energía con corrección del factor de potencia [6]. | 14 |
| Ilustración 5 - Convertidor elevador de múltiples entradas para baja potencia [7]. ... | 15 |
| Ilustración 6 - Convertidor CD/CD de múltiples salidas basado en el convertidor Flyback [8]..... | 15 |
| Ilustración 7 - Cargador integrado de baterías con factor de corrección de potencia [9]. | 16 |
| Ilustración 8 – Topología propuesta. | 20 |
| Ilustración 9 – Modo de operación 1 de la topología..... | 21 |
| Ilustración 10 - Modo de operación 2 de la topología propuesta. | 21 |
| Ilustración 11 - Modo de operación 3 de la topología propuesta. | 22 |
| Ilustración 12 - Interruptor Sw1 encendido, modo de operación 1 de la topología. | 23 |
| Ilustración 13 - Interruptor Sw1 apagado, modo de operación 1 de la topología. | 24 |
| Ilustración 14 - Interruptor Sw2 encendido, modo de operación 1 de la topología. | 29 |

| | |
|--|-----------|
| Ilustración 15 - Interruptor Sw2 apagado, modo de operación 1 de la topología. | 30 |
| Ilustración 16 - Interruptor Sw1 encendido, modo de operación 2 de la topología. | 35 |
| Ilustración 17 - Circuito equivalente cuando el interruptor Sw1 está encendido, modo de operación 2 de la topología. | 35 |
| Ilustración 18 - Interruptor Sw1 apagado, modo de operación 2 de la topología. | 37 |
| Ilustración 19 - Interruptores Sw3 y Sw5 encendidos, modo de operación 3 de la topología. | 42 |
| Ilustración 20 - Interruptores Sw3 y Sw5 apagados, modo de operación 3 de la topología. | 42 |
| Ilustración 21 – Diagrama de Bode de la planta sin compensador, magnitud. | 48 |
| Ilustración 22 – Diagrama de Bode de la planta sin compensador, fase. | 48 |
| Ilustración 23 – Compensador propuesto para controlar el sistema. | 49 |
| Ilustración 24 – Diagrama de Nyquist con compensador. | 50 |
| Ilustración 25 – Diagrama de Bode de la planta con compensador, magnitud. | 50 |
| Ilustración 26 – Diagrama de Bode de la planta con compensador, fase. | 50 |
| Ilustración 27 – Diagrama de Nyquist con ajuste en el compensador. | 51 |
| Ilustración 28 – Diagrama de Bode de la planta con ajuste en el compensador, magnitud. | 51 |
| Ilustración 29 – Diagrama de Bode de la planta con ajuste en el compensador, fase. | 51 |
| Ilustración 30 – Respuesta al escalón del sistema con el compensador modificado. | 52 |
| Ilustración 31 – Señales de control de los interruptores Sw1 y Sw2, modo de operación 1. | 58 |
| Ilustración 32 – Voltaje de salida, modo de operación 1. | 58 |
| Ilustración 33 – Corriente del inductor primario 1 y corriente del inductor secundario (de arriba para abajo), modo de operación 1. | 58 |
| Ilustración 34 – Señal de control para el interruptor Sw1, modo de operación 2. | 59 |
| Ilustración 35 - Voltaje de salida, modo de operación 2. | 59 |
| Ilustración 36 - Corriente del inductor primario, corriente del inductor de la batería y corriente del inductor secundario (de arriba para abajo), modo de operación 2. | 59 |
| Ilustración 37 - Señales de control de los interruptores Sw3 y Sw5, modo de operación 3. | 60 |
| Ilustración 38 - Voltaje de salida, modo de operación 3. | 60 |
| Ilustración 39 - Corriente del inductor de la batería y corriente del inductor secundario (de arriba para abajo), modo de operación 3. | 60 |
| Ilustración 40 – Topología propuesta implementada. | 62 |
| Ilustración 41 - Señal del impulsor del interruptor Sw1. | 63 |
| Ilustración 42 - Prueba a lazo abierto, modo de operación 1.a, V_{s1} a 0V. De arriba hacia abajo: Tensión de entrada, tensión de salida, V_{DS} del interruptor que se encuentra conmutando. | 65 |
| Ilustración 43 - Prueba a lazo abierto, modo de operación 1.a, V_{s1} a 20V. De arriba hacia abajo: Tensión de entrada, tensión de salida, V_{DS} del interruptor que se encuentra conmutando. | 66 |

| | |
|--|-----------|
| Ilustración 44 - Prueba a lazo abierto, modo de operación 1.a, V_{s1} a 40V. De arriba hacia abajo: Tensión de entrada, tensión de salida, V_{DS} del interruptor que se encuentra conmutando..... | 67 |
| Ilustración 45 - Prueba a lazo abierto, modo de operación 1.a, V_{s1} a 58V. De arriba hacia abajo: Tensión de entrada, tensión de salida, V_{DS} del interruptor que se encuentra conmutando..... | 68 |
| Ilustración 46 - Prueba a lazo abierto, modo de operación 2.a, V_{s2} a 0V. De arriba hacia abajo: Tensión de entrada, tensión de salida, V_{DS} del interruptor que se encuentra conmutando..... | 69 |
| Ilustración 47 - Prueba a lazo abierto, modo de operación 2.a, V_{s2} a 20V. De arriba hacia abajo: Tensión de entrada, tensión de salida, V_{DS} del interruptor que se encuentra conmutando..... | 70 |
| Ilustración 48 - Prueba a lazo abierto, modo de operación 2.a, V_{s2} a 40V. De arriba hacia abajo: Tensión de entrada, tensión de salida, V_{DS} del interruptor que se encuentra conmutando..... | 71 |
| Ilustración 49 - Prueba a lazo abierto, modo de operación 2.a, V_{s2} a 58V. De arriba hacia abajo: Tensión de entrada, tensión de salida, V_{DS} del interruptor que se encuentra conmutando..... | 72 |
| Ilustración 50 - Prueba a lazo abierto, modo de operación 3.a, V_{Bat} a 0V. De arriba hacia abajo: Tensión de entrada, tensión de salida, V_{DS} del interruptor que se encuentra conmutando..... | 73 |
| Ilustración 51 - Prueba a lazo abierto, modo de operación 3.a, V_{Bat} a 12V. De arriba hacia abajo: Tensión de entrada, tensión de salida, V_{DS} del interruptor que se encuentra conmutando..... | 74 |
| Ilustración 52 - Prueba a lazo abierto, modo de operación 3.a, V_{Bat} a 24V. De arriba hacia abajo: Tensión de entrada, tensión de salida, V_{DS} del interruptor que se encuentra conmutando..... | 75 |
| | |
| Tabla 2.1 – Modos de operación de la topología..... | 22 |
| Tabla 2.2 – Parámetros de diseño del convertidor propuesto | 47 |
| Tabla 2.3 – Comportamiento de los tres modos de operación de la planta con el compensador propuesto | 52 |
| | |
| Tabla 3.1 – Modos de operación del convertidor propuesto para pruebas a lazo abierto..... | 62 |

i. INTRODUCCIÓN

Los combustibles que son más usados actualmente para satisfacer las necesidades energéticas de la población son petróleo, gas natural y carbón; los cuales son meramente finitos por que a corto plazo se agotarán, de ahí que sean llamados “energías no renovables”. Para fortuna existen formas de energía cuya fuente es prácticamente inagotable, con respecto al tiempo de vida promedio de un ser humano. Estas energías tienen la ventaja de tener un impacto ambiental menor que el de las fuentes convencionales, poseen potencial para satisfacer las necesidades energéticas presentes y futuras de la humanidad, además contribuyen a conservar los recursos no renovables y producen energía útil y limpia.

Las tecnologías para aprovechar las fuentes de energía renovable han estado presentes a lo largo de la historia de la humanidad, sin embargo, fueron puestas en desuso con el surgir de la revolución industrial cuyo motor fue la máquina de vapor que requería para su funcionamiento el carbón, a partir de este evento histórico, las energías renovables fueron sustituidas por hidrocarburos. No obstante, gracias a la investigación de nuevas tecnologías para el aprovechamiento de recursos renovables, se ha intensificado su uso nuevamente.

Una sociedad industrializada es conocida como aquella que utiliza a gran escala combustibles fósiles y nucleares, sin embargo, la manipulación excesiva de estos ha generado la concientización de dichas sociedades en cuanto al almacenamiento de desechos, lluvia ácida, calentamiento global y el deterioro de la capa de ozono. Esto ha derivado en leyes emitidas y promulgadas por los gobiernos en cuanto a criterios ambientales, sugiriendo así el aumento del uso de energías renovables como solución a los planteamientos anteriores y lograr un desarrollo sostenible.

Las energías renovables son muy abundantes y pueden contribuir a satisfacer sin dudar, la demanda energética del campo y las ciudades. En México se cuenta con el capital humano para generar investigación y tecnología y promover su uso, que a su vez generaría nuevos empleos. Pero garantizar el éxito a largo plazo de un desarrollo sustentable en el país, depende del compromiso del gobierno en cuanto a generación de políticas, financiamientos y marcos legales. Existe aún una gran oportunidad de preservar los hidrocarburos fósiles y hacer uso de la energía limpia que tan abundantemente existe en nuestro entorno.

La energía solar es una de las fuentes principales y más conocidas de energía renovable, pero existen otros tipos igualmente efectivos de los cuales también se produce energía limpia y útil. Algunas fuentes de energía renovable son:

- Solar. Aquella que se obtiene de la radiación del sol.
- Eólica. La que se obtiene de la velocidad y fuerza del viento.
- Geotérmica. La obtenida del calor almacenado dentro de la tierra.
- Hidroeléctrica. Aquella que se obtiene de la energía potencial del agua.
- Biomasa. Energía obtenida de materia orgánica generada en un proceso biológico espontáneo o provocado.
- Mareomotriz. La energía obtenida del ascenso y descenso de las mareas que se producen en los océanos.

Aún queda mucho trabajo por hacer, mucho por crecer en cuanto a investigación y desarrollo para poder aprovechar completamente las fuentes de energía renovable; solamente una pequeña parte del potencial de estas energías es utilizado actualmente; es notable mencionar que, del total de energía generada anualmente en todo el mundo, la mayor parte es producida utilizando combustibles fósiles y el resto se obtiene de otras fuentes de energía: hidráulica, geotérmica, biomasa, solar, eólica.

Para este proyecto de tesis cabe resaltar la utilización de paneles solares para la generación de energía eléctrica y la conversión de ésta a través de un convertidor de potencia.

Un convertidor de potencia es capaz de modificar el voltaje y la corriente que recibe a su entrada y obtener a su salida un voltaje y una corriente deseados para una aplicación en específico.

La planta propuesta es un sistema de tres entradas: dos paneles fotovoltaicos y baterías. La función de las múltiples entradas es para asegurar el suministro constante de energía hacia la carga; si uno de los paneles solares no funciona apropiadamente, se tiene como respaldo la batería y un segundo panel fotovoltaico; si ninguno de los paneles solares funciona se cuenta con el respaldo de la batería que previamente fue cargada por uno o ambos paneles solares. La topología utilizada está basada en un convertidor Flyback.

Un convertidor Flyback posee la misma estructura que un reductor-elevador, pero con aislamiento galvánico; se utilizan dos bobinas acopladas para el aislamiento en lugar de un transformador; como la planta propuesta es un convertidor Flyback de múltiples entradas, se utilizan tres inductancias acopladas con un solo núcleo para la transferencia de energía hacia la carga.

En el capítulo uno se presenta el estado del arte de convertidores de múltiples entradas. En el capítulo dos se reporta la topología propuesta y su análisis matemático, así como el diseño del mismo. El capítulo tres explica la implementación física del convertidor, así como el cálculo de los elementos para obtener la salida deseada y los resultados de las pruebas en lazo abierto. Y finalmente son reportadas las conclusiones.

ii. ABSTRACT

Fuels currently used to achieve the needs of the global population are oil, natural gas, and coal are merely finite, in a very short term they will be exhausted, and that is why they are called "non-renewable energies". Fortunately there are new forms of energy which source is practically inexhaustible, this about average life time of a human being. These forms of energy have the advantage of having a smaller environmental impact than the conventional sources, also have the potential to meet the actual and future energy needs of human kind, and contribute to preserve the non-renewable sources and produce useful and clean energy.

Technology to take advantage of renewable energy sources have always been present throughout the history of humanity, those were put in disuse with the emergence of industrial revolution, which main factor was the steam engine that required coal for its operation. From there, renewable energies were replaced by hydrocarbons. However, thanks to the investigation of new technologies for the use of renewable resources, its use has been intensified again.

An industrialized society is known as that one that uses large-scale fossil and nuclear fuels, however, the excessive manipulation of these has generated the awareness of these societies in terms of storage of wastes, acid rain, global warming, and deterioration of the ozone layer. This has resulted in promulgated issued laws by governments regarding environmental criteria, suggesting the increased use of renewable energy as a solution to the previous approaches to achieve a sustainable development.

Renewable energies are very abundant and can contribute to satisfy without any doubt the energy demand of countries. In México there is human capital to generate research and technology to promote its use, which would generate new jobs. But to ensure a long-term success of sustainable development in the countries, the government must be committed to: generate policies, financing, and legal frameworks. There is still a great opportunity to preserve fossil hydrocarbons and make use of clean energy.

Solar energy is one of the main and best known renewable energy source, but there are others equally effective types to produce clean and useful energy sufficiently abundant to solve the imminent disappearance of fossil fuels. Some sources of renewable energy are:

- Solar energy: which is obtained from sun radiation.

- Wind power: which is obtained from wind force and speed.
- Geothermal energy: is obtained from the heat stored in earth.
- Hydroelectric power: is obtained from the water potential energy.
- Biomass: Energy obtained from organic products generated in a spontaneous or provoked biological process
- Seawater energy: Energy obtained from the rise and fall of the tides that occur in the oceans

There is still an appreciable amount of work to be done, a great deal to grow up in terms of research and development in order to take full advantage of renewable energy sources; only a small part of the potential of these energies is currently used; it is noteworthy to mention that of the total energy annually generated around the world, most of it is produced using fossil fuels and the rest is obtained from other sources of energy: hydropower, geothermal, biomass, solar, wind.

For this thesis project it is worth highlighting the use of solar panels for the generation of electrical energy and the conversion of this one through a power converter.

A power converter is able to modify the voltage and current it receives at its input and obtain at its output a desired voltage and current for a specific application.

The proposed plant is a system of three inputs: two photovoltaic panels and a set of batteries. The function of the multiple inputs is to ensure the constant supply of energy to the load; if one of the solar panels does not work properly, the set of batteries and the second photovoltaic panel are backed up; if none of the solar panels works, it has the backup of the set of batteries that was previously charged by one or both solar panels. The proposed topology is based on the Flyback converter.

A Flyback converter has the same structure as a Buck-Boost converter but with galvanic isolation: two coupled coils as insulation; as the proposed plant is a multiple input Flyback converter, three coupled inductances with a single core are used to transfer energy to the load.

In chapter one of the present work, the state of the art of multi-input converters is presented. Chapter two presents the proposed topology and its mathematical analysis, as well its design.

Chapter three explains the physical implementation of the converter, as well as the calculation of the elements to obtain the desired output and the results of the open loop tests. Finally, the conclusions are reported.

Capítulo 1. Estado del Arte

1.1 Resumen

En esta sección se presenta también una breve introducción de la energía solar, así como una revisión de las topologías reportadas y sobre las cuales la propuesta de tesis está basada, haciendo notar la importancia del uso de múltiples entradas para asegurar un suministro continuo de energía a la carga.

1.2 Energía renovable

La energía renovable es aquella que proviene de fuentes naturales, siendo así limpias y prácticamente inagotables. Ya que los combustibles fósiles son cada vez más escasos es importante hacer uso de las energías limpias. Algunas fuentes de este tipo de energía son: la que provee el viento, la solar, la hidroeléctrica y la biomasa.

1.2.1 Energía solar

De entre todas las estrellas de la galaxia, sin duda la más importante para nosotros es el sol ya que sin ella no existiría vida sobre la tierra. El sol es una fuente importante de energía cuyo uso presenta ventajas y desventajas. Algunas ventajas son: su naturaleza “infinita” y renovable y ser una forma de generación de energía limpia, sin producir desechos o contaminar al ambiente. Entre las desventajas se pueden mencionar: la intermitencia constante en la emisión de su energía debida entre otros factores, al clima y a la contaminación ambiental.

Las reacciones termonucleares del sol general una gran cantidad de energía que es liberada al espacio, y una mínima parte llega a la tierra; como se mencionó, no toda la radiación que emite el sol llega a la superficie terrestre, sin embargo, ésta es suficiente para alimentar un panel fotovoltaico y generar energía limpia.

1.2.2 Panel fotovoltaico

Para México, en el año 2009 fue emitido por parte de la Presidencia de la República el *Reglamento de la ley para el aprovechamiento de energías renovables y el financiamiento de la transición energética* [1]; dentro de sus diversos títulos, capítulos y artículos, fomenta la producción de energía a través de fuentes renovables y el financiamiento para dicha producción, así como el fortalecimiento de la seguridad energética del país, al diversificar las fuentes de energía para la generación eléctrica. Lo anterior implica mucho mayor apoyo por

parte de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) para reducir costos al instalar paneles fotovoltaicos para alimentar una vivienda o una pequeña empresa, reduciendo así emisiones contaminantes al medio ambiente fomentando el uso de energía limpia y renovable.

El panel solar o fotovoltaico es un dispositivo que capta la radiación emitida por el sol para aprovecharla de diferentes maneras, en el caso particular de este trabajo de tesis, para producir energía eléctrica; éste se compone de celdas que permiten la conversión de la radiación emitida por el sol en electricidad, gracias al comportamiento de los componentes de cada celda al recibir dicha energía.

El panel es construido comúnmente de silicio cristalino, cuyas propiedades conductoras se encuentran entre las de los materiales conductores y los materiales aislantes [2]. Existen varios tipos de paneles fotovoltaicos, los más comunes son:

- De silicio mono cristalino. Son fabricados en forma cilíndrica y posteriormente son cortados en forma de "oblas". Su proceso de fabricación es lento, de alto costo y de alto consumo energético.
- De silicio poli cristalino. Son fabricados en forma rectangular y su costo de fabricación es mucho menor que el de los paneles fotovoltaicos de silicio mono cristalino. En el año 2010 presentaban una eficiencia entre el 13% y el 16%, valores que han ido aumentando con el paso del tiempo gracias a la investigación para mejorar los materiales involucrados en su construcción [3].
- De capa fina. Su proceso de fabricación consiste en colocar una fina capa de semiconductor sobre cristal. Un problema con estos paneles es la baja eficiencia que presentan respecto a los paneles solares de silicio mono cristalino y los paneles solares de silicio poli cristalino.

Los parámetros que definen el funcionamiento de un panel fotovoltaico independientemente de su tipo son [3]:

- Corriente de corto circuito. I_{SC} , máxima corriente que se obtiene de un panel solar. Se obtiene midiendo la corriente entre las terminales del panel cuando se provoca un corto circuito.

- Voltaje en circuito abierto. V_{OC} , máximo voltaje que se obtiene en un panel fotovoltaico sin corriente entra sus terminales.
- Voltaje nominal. V_n , valor de diseño al que trabaja el panel.
- Potencia máxima. P_M , máxima potencia que se obtiene del panel
- Voltaje máximo. V_M , valor del voltaje para la potencia máxima del panel solar, aproximadamente un 80% del V_{OC} ; también se conoce como V_{MP} .
- Corriente máxima. I_M , valor de la corriente para la potencia máxima del panel solar. También se conoce como I_{MP} .

La ilustración 1 muestra los parámetros descritos sobre la curva $V-I$ de un panel fotovoltaico. Se puede apreciar el voltaje en circuito abierto (V_{OC}), la corriente de corto circuito (I_{SC}) y el voltaje máximo (V_{MP}), de estos valores se puede calcular la potencia máxima (P_M).

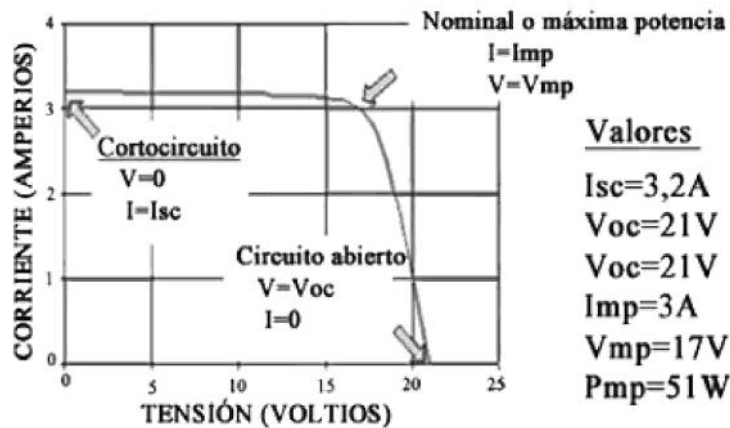


Ilustración 1 - Curva típica de un panel fotovoltaico [3].

1.3 Sistemas convertidores de potencia

Un convertidor de potencia es un sistema cuyo fin es convertir la corriente eléctrica que recibe a su entrada con determinadas características, en corriente eléctrica con otro tipo de atributos deseados a su salida.

La necesidad de contar con estas estructuras electrónicas de conversión se debe, en la mayoría de los casos, a que una fuente de energía eléctrica posee atributos específicos de amplitud, frecuencia y fase, que son características no compatibles con una aplicación en específico;

por lo que es necesario incluir un convertidor que logre a su salida, las características deseadas para la aplicación.

Una vez que se ha producido energía eléctrica con las características deseadas, es posible almacenarla para ser usada posteriormente o inyectarla directamente en la red eléctrica; de lo anterior se tienen dos tipos de convertidores de potencia, los sistemas aislados y los sistemas conectados a la red.

- Sistemas aislados. Permiten almacenar la energía generada en baterías para ser usada posteriormente o bien, ser trasladada a lugares donde se necesite.
- Sistemas conectados a la red. La energía generada es transmitida a la red eléctrica. En México, los excedentes de la energía inyectada a la red son compensados por la CFE, esto mediante la instalación de un medidor bidireccional que identifica la energía consumida y la energía generada.

Dadas las características de diseño del presente trabajo, es considerado como un sistema aislado.

1.4 Topologías del estado del arte para sistemas renovables

1.4.1 Convertidor CD/CD de tres puertos para sistema fotovoltaico independiente

La topología presentada en [4] cuenta con una fuente renovable de energía como fuente de entrada y un banco de baterías; tiene tres interruptores cuyas combinaciones de activación hacen que el convertidor opere en cuatro modos de operación donde: solo la fuente renovable aporta potencia a la carga, solo el banco de baterías aporta potencia a la carga, ambas fuentes aportan potencia a la carga y donde la fuente renovable aporta potencia para cargar la batería. Este convertidor es mostrado en la ilustración 2.

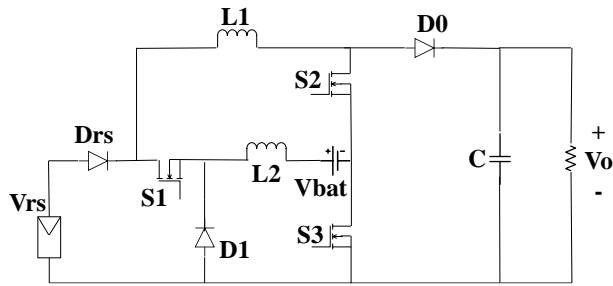


Ilustración 2 - Convertidor CD/CD de tres puertos para sistema fotovoltaico independiente [4].

1.4.2 Convertidor CD/CD de dos entradas aplicable en fuentes de energía limpia

La topología mostrada en [5] utiliza como fuente de entrada un aerogenerador como fuente principal y un banco de baterías como fuente auxiliar, esto para mantener constante el suministro de energía. La potencia de entrada es variable ya que la potencia del aerogenerador depende de la velocidad del viento. El aerogenerador trabaja de acuerdo a su curva característica de potencia. Si la fuente principal se encuentra operando correctamente puede entregar potencia a la carga; si la fuente principal no se encuentra disponible, el banco de baterías entrega potencia a la carga; si ambas fuentes funcionan correctamente, ambas entregarán potencia a la carga. El convertidor es presentado en la ilustración 3.

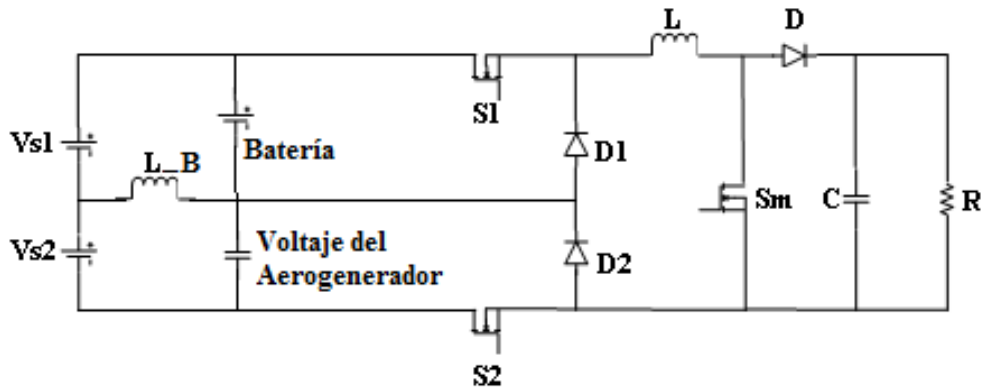


Ilustración 3 - Convertidor CD/CD de dos entradas aplicable en fuentes de energía limpia [5].

1.4.3 Novedoso sistema de suministro de energía con corrección del factor de potencia

La topología explicada en [6] presenta una fuente ininterrumpible de potencia con corrección del factor de potencia, distorsión armónica total baja y buena respuesta dinámica ante el comportamiento en CA en el voltaje de salida. Tiene dos etapas: la primera es un cargador de baterías utilizando un convertidor Flyback que permite obtener un alto factor de potencia, y aislamiento entre la entrada y la carga. Es utilizado un solo elemento magnético. La segunda etapa es una topología inversora que posee características elevadoras. La topología se expone en la ilustración 4.

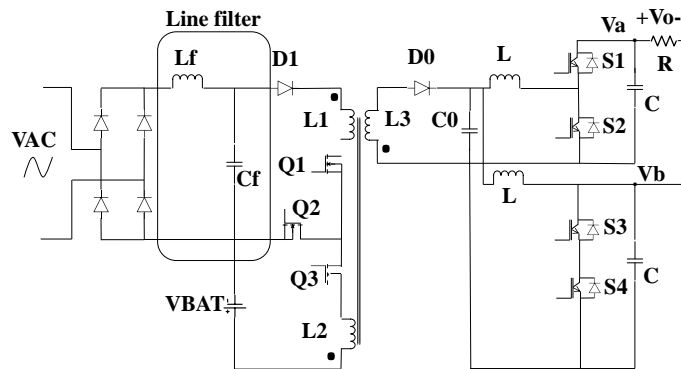


Ilustración 4 - Sistema de suministro de energía con corrección del factor de potencia [6].

1.4.4 Convertidor elevador de múltiples entradas para baja potencia

La topología propuesta en [7] está diseñada para obtener la máxima potencia de múltiples fuentes de energía de baja potencia. Las entradas son multiplexadas. Para K fuentes de entrada son necesarios K+1 interruptores, se utiliza un solo inductor y un solo diodo. Esta topología comparada con un convertidor convencional de K entradas, utiliza K-1 inductores y K-1 diodos y solo requiere un interruptor adicional para su correcto funcionamiento. La topología es eficiente en cuanto a tamaño y costo ya que reduce el uso de elementos en su diseño. El convertidor está indicado en la ilustración 5.

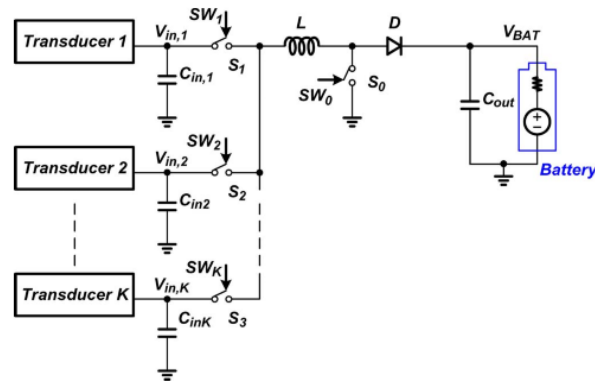


Ilustración 5 - Convertidor elevador de múltiples entradas para baja potencia [7].

1.4.5 Convertidor CD/CD de múltiples salidas basado en el convertidor Flyback

La topología propuesta en [8] está basada en un convertidor Flyback utilizando un solo elemento magnético y entregando múltiples salidas todas ellas reguladas. Lo anterior presenta una nueva solución para aplicaciones que requieren varias salidas, ya que tradicionalmente para obtener múltiples salidas reguladas, se requieren múltiples convertidores elevando el costo y generalmente se obtiene solo una salida regulada. La topología es mostrada en la ilustración 6.

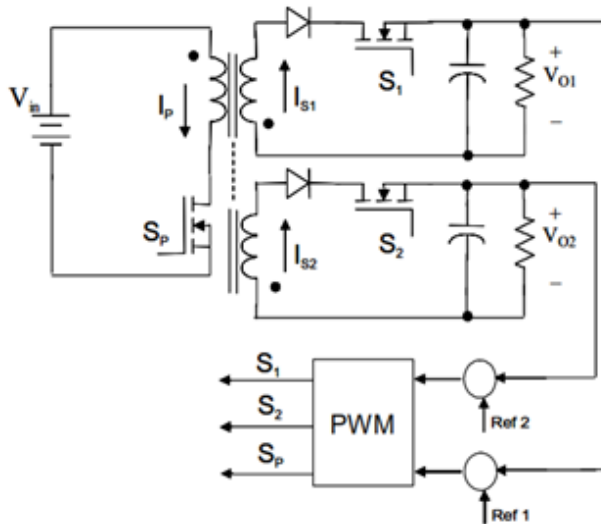


Ilustración 6 - Convertidor CD/CD de múltiples salidas basado en el convertidor Flyback [8].

1.4.6 Cargador integrado de baterías con corrección del factor de potencia

La topología de [9] trabaja como un pre-regulador con capacidad de controlar el factor de potencia con una batería del lado primario. Utiliza un convertidor Flyback en cuyo modo normal de operación es capaz de recargar la batería si ésta así lo requiere, además de protegerla de altos niveles de corriente. En caso de que la entrada principal tenga algún fallo, la carga recibe energía de la batería; si la fuente principal y la batería se encuentran funcionando correctamente, ambas entregan energía a la carga. Si la potencia demandada por la carga no sobrepasa la capacidad de la fuente principal y la batería se encuentra descargada, la fuente puede cargarla y entregar potencia a la carga. La topología se muestra en la ilustración 7.

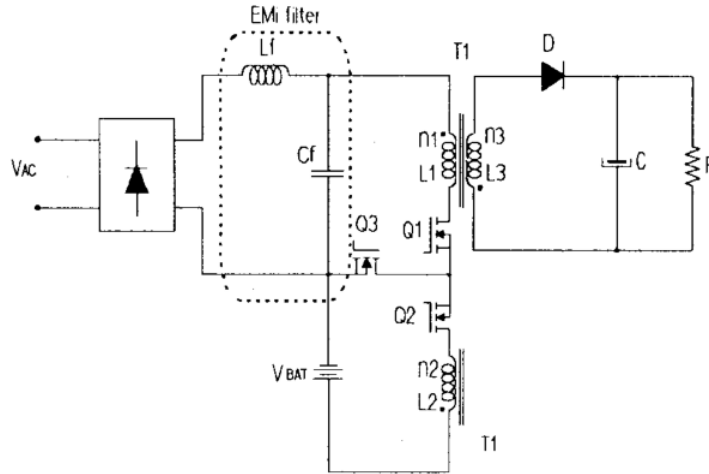


Ilustración 7 - Cargador integrado de baterías con factor de corrección de potencia [9].

1.5 Propuesta de tesis

El trabajo propuesto en esta tesis está basado en las topologías existentes con múltiples entradas y en las topologías que cuentan con un sistema de respaldo como son los bancos de baterías. Lo anterior con el propósito de proveer energía constante a la carga a través de dos paneles solares y en caso de que estos no se encuentren disponibles, se cuenta con un banco de baterías que puede ser cargado por uno o ambos paneles cuando se encuentra descargado.

La planta presentada es un convertidor Flyback multi-entradas, que utiliza un solo elemento magnético como componente aislante, tiene la capacidad de regular independientemente cada entrada, y también provee una función de cargar/descargar una batería como respaldo.

Se propone una nueva configuración con la finalidad de ofrecer una opción más con respecto al uso de energías renovables, teniendo la posibilidad de extrapolar las entradas de la topología a n entradas, esto a reserva de verificar que la potencia entregada por el convertidor sea suficiente y necesaria para proporcionar energía a la aplicación deseada.

Capítulo 2. Topología Propuesta

2.1 Resumen

Los paneles fotovoltaicos se usan en más de un módulo para poder incrementar la potencia del sistema; con el propósito de garantizar el punto máximo de potencia se utiliza un convertidor por cada panel, o un convertidor multientradas que sea capaz de controlar independientemente cada una de ellas. Cuando se utilizan paneles solares, la opción para incrementar la potencia es usar más de un módulo. Si son conectados en serie o en paralelo, el máximo punto de potencia no puede ser alcanzado propiamente debido a diferencias entre ellos o debido a condiciones externas. Para asegurar la mejor operación de los paneles solares, se sugiere utilizar un convertidor por cada panel o considerar un convertidor multientradas.

En este capítulo se describe el convertidor propuesto, basado en el convertidor Flyback, pero múltiples entradas son utilizadas y se tiene un respaldo. Las fuentes de entrada pueden ser usadas para entregar energía a la carga simultánea o independientemente, cualquiera de ellas puede ser usada también para cargar la batería.

2.2 Topología propuesta

El trabajo de tesis propone un convertidor que es presentada en la ilustración 8, tiene dos paneles solares (V_{s1} y V_{s2}) como entrada y una batería de respaldo (V_{Bat}). Una o ambas fuentes son capaces de entregar energía a la carga y cargar la batería si ésta se encuentra descargada. Si ninguna fuente se encuentra disponible, la batería entrega energía a la carga.

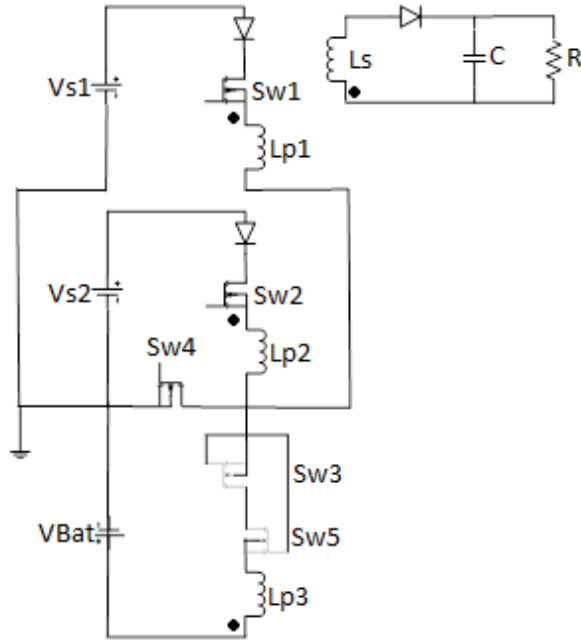


Ilustración 8 – Topología propuesta.

La función de los diodos es prevenir que al momento de que el interruptor que se encuentra conmutando se cierre, la energía almacenada en el inductor que debe de ser transferida a la carga sea entregada a la fuente de entrada; este diodo solo está presente con las fuentes de entrada V_{s1} y V_{s2} , ya que los diodos de los interruptores S_{w3} y S_{w5} conectados en anti paralelo realizan esta función.

2.3 Modos de operación el convertidor propuesto

El convertidor tiene tres diferentes modos básicos de operación, los cuales son descritos a continuación.

2.3.1 Modo de operación 1

Este modo es utilizado para entregar energía a la carga desde las dos fuentes de entrada; el interruptor S_{w4} es encendido, los interruptores S_{w3} y S_{w5} son apagados, los interruptores S_{w1} y S_{w2} se encuentran conmutando. La ilustración 9 muestra el circuito equivalente de este modo de operación.

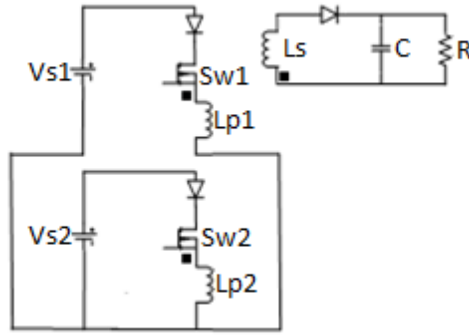


Ilustración 9 – Modo de operación 1 de la topología.

2.3.2 Modo de operación 2

Este modo es utilizado para cargar la batería desde una de las fuentes de entrada, pero también es posible entregar energía a la carga; el interruptor S_{w4} es apagado, los interruptores S_{w3} y S_{w5} son encendidos, los interruptores S_{w1} o S_{w2} se encuentran conmutando. La ilustración 10 muestra el circuito equivalente para este modo de operación.

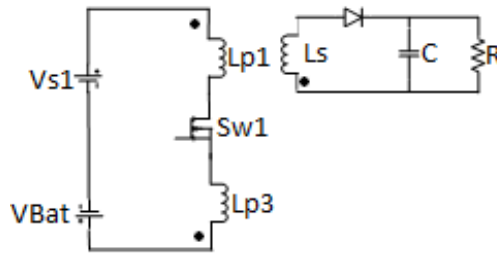


Ilustración 10 - Modo de operación 2 de la topología propuesta.

2.3.3 Modo de operación 3

Éste es el modo respaldo, aquí la batería es utilizada para entregar energía a la carga; el interruptor S_{w4} es encendido, los interruptores S_{w3} y S_{w5} están conmutando, los interruptores S_{w1} y S_{w2} son apagados. En la ilustración 11 el circuito equivalente de este modo de operación es presentado.

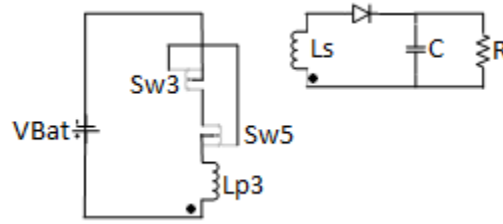


Ilustración 11 - Modo de operación 3 de la topología propuesta.

La Tabla 2.1 resume los modos de operación, así como el estado de los interruptores y las fuentes activas en cada uno de ellos.

Tabla 2.1 Modos de operación del convertidor propuesto

| Modo de operación | Fuentes activas | Interruptores | | | | |
|-------------------|-------------------|---------------|----------|----------|----------|----------|
| | | S_{w1} | S_{w2} | S_{w3} | S_{w4} | S_{w5} |
| 1 | V_{s1}, V_{s2} | x | x | 0 | 1 | 0 |
| 2 | V_{s1}, V_{Bat} | x | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 3 | V_{Bat} | 0 | 0 | x | 1 | x |

‘x’ – Interruptor conmutando
 ‘1’ – Interruptor encendido
 ‘0’ – Interruptor apagado

2.4. Diseño del control para regular el voltaje de salida del convertidor propuesto

En esta sección es presentado el análisis para obtener el compensador para cerrar el lazo de la topología y así controlar el voltaje de salida. El análisis realizado a la planta presentada es similar al del convertidor Flyback de una entrada. La técnica de control utilizada es la clásica.

Para el análisis, las siguientes consideraciones son tomadas en cuenta:

$$n = \frac{N_s}{N_p} \quad (2.1)$$

Donde: n = Relación de transformación.

N_s = Número de vueltas en el secundario.

N_p = Número de vueltas en el primario.

$$iL_s = \frac{1}{n} iL_p \quad (2.2)$$

Donde: iL_s = Corriente en el secundario.

iL_p = Corriente en el primario.

$$L_s = n^2 L_p \quad (2.3)$$

Donde: L_p = Inductancia primaria.

L_s = Inductancia secundaria.

Una vez descritas las consideraciones necesarias, se comienza el análisis para el control del voltaje de salida del convertidor propuesto, en sus tres modos de operación.

2.4.1 Análisis para el control del voltaje de salida, modo de operación 1

Se analiza este modo de operación considerando el circuito equivalente mostrado en la ilustración 9. En este modo, ambos interruptores (S_{w1} y S_{w2}) se encuentran conmutando, existiendo entre la conmutación de ambos un tiempo muerto, el suficiente para permitir al inductor utilizado que se descargue. L_{p1} y L_{p2} se encuentran en modo de conducción continuo y L_s en modo de conducción discontinuo. Por lo tanto:

- Cuando el interruptor S_{w1} se encuentra encendido, el interruptor S_{w2} se encuentra apagado y después debe haber un tiempo con ambos en apagado.
- Cuando el interruptor S_{w1} se encuentra apagado, el interruptor S_{w2} se encuentra encendido y después debe haber un tiempo con ambos en apagado.

Para el análisis se considera que cada fuente opera de forma independiente y solo se usa una de ellas.

La ilustración 12 muestra el circuito equivalente cuando el interruptor S_{w1} se encuentra encendido.

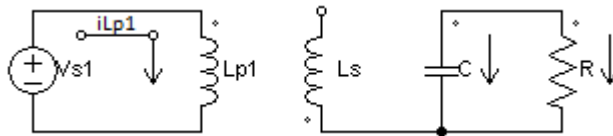


Ilustración 12 - Interruptor S_{w1} encendido, modo de operación 1 de la topología.

Las ecuaciones que describen el comportamiento del circuito de la ilustración 12 son descritas a continuación.

$$-V_{s1} + V_{Lp1} = 0 \quad (2.4)$$

$$-V_{s1} + L_{p1} \frac{d_{iLp1}}{dt} = 0 \quad (2.5)$$

$$\frac{d_{Li_{p1}}}{dt} = \frac{V_{s1}}{L_{p1}} \quad (2.6)$$

$$-i_c - i_R = 0 \quad (2.7)$$

$$C \frac{d_{v_c}}{dt} + \frac{v_c}{R} = 0 \quad (2.8)$$

$$\frac{d_{v_c}}{dt} = -\frac{v_c}{RC} \quad (2.9)$$

Las ecuaciones (2.4) - (2.6) corresponden al análisis de la malla del lado primario del circuito de la ilustración 14. Las ecuaciones (2.7) - (2.9) corresponden al análisis del nodo del lado secundario del circuito de la ilustración 12.

La ilustración 13 muestra el circuito equivalente cuando el interruptor S_{w1} se encuentra apagado.

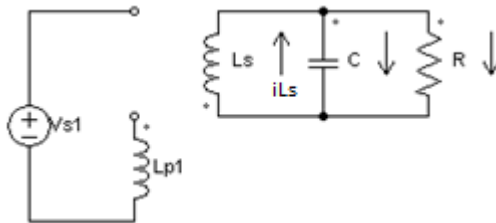


Ilustración 13 - Interruptor S_{w1} apagado, modo de operación 1 de la topología.

Las ecuaciones que describen el comportamiento del circuito de la ilustración 13 son descritas a continuación.

$$v_{L_s} + v_C = 0 \quad (2.10)$$

$$L_s \frac{d i_{L_s}}{d t} = -v_C \quad (2.11)$$

$$\frac{d i_{L_s}}{d t} = -\frac{v_C}{L_s} \quad (2.12)$$

$$i_{L_s} = i_C + i_R \quad (2.13)$$

Aplicando (2.2) y (2.3) en (2.12) se obtiene:

$$\frac{d i_{L_{p1}}}{d t} = -\frac{v_C}{n L_{p1}} \quad (2.14)$$

Sustituyendo i_{L_s} por $i_{L_{p1}}$ en (2.13) se obtiene:

$$\frac{1}{n} i_{L_{p1}} = C \frac{d v_C}{d t} + \frac{v_C}{R} \quad (2.15)$$

$$\frac{d v_C}{d t} = \frac{i_{L_{p1}}}{n C} - \frac{v_C}{R C} \quad (2.16)$$

Las ecuaciones (2.10) - (2.12) y (2.14) corresponden al análisis de la malla de la parte del secundario del circuito de la ilustración 13. Las ecuaciones (2.13), (2.15) y (2.16) corresponden al análisis del nodo de salida del circuito de la ilustración 13.

Las ecuaciones de estados del interruptor S_{w1} cuando se encuentra encendido se obtiene de las ecuaciones (2.6) y (2.9), esto es:

$$\begin{bmatrix} \frac{d i_{L_{p1}}}{d t} \\ \frac{d v_C}{d t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{R C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{L_{p1}} \\ v_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{p1}} \\ 0 \end{bmatrix} v_{S1} \quad (2.17)$$

Las ecuaciones de estados del interruptor S_{w1} cuando se encuentra apagado se obtiene de las ecuaciones (2.14) y (2.16), esto es:

$$\begin{bmatrix} \frac{d i_{Lp1}}{d_t} \\ \frac{d v_C}{d_t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{nL_{p1}} \\ \frac{1}{nC} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{Lp1} \\ v_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} v_{s1} \quad (2.18)$$

Para obtener las matrices de estado promediadas del interruptor S_{w1} cuando se encuentra encendido y apagado, se utiliza (2.19) [37]:

$$\dot{x} = [A_1 d + A_2(1 - d)]x + [B_1 d + B_2(1 - d)]u \quad (2.19)$$

La ecuación de estado promediada del interruptor S_{w1} cuando se encuentra encendido se obtiene aplicando (2.19) a (2.17):

$$\begin{bmatrix} \frac{d i_{Lp1}}{d_t} \\ \frac{d v_C}{d_t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{d}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{Lp1} \\ v_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{d}{L_{p1}} \\ 0 \end{bmatrix} v_{s1} \quad (2.20)$$

La ecuación de estado promediada del interruptor S_{w1} cuando se encuentra apagado se obtiene aplicando (2.19) a (2.18):

$$\begin{bmatrix} \frac{d i_{Lp1}}{d_t} \\ \frac{d v_C}{d_t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1-d}{nL_{p1}} \\ \frac{1-d}{nC} & -\frac{1-d}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{Lp1} \\ v_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} v_{s1} \quad (2.21)$$

De (2.20) y (2.21) se obtiene el sistema promediado:

$$\begin{bmatrix} \frac{d i_{Lp1}}{d_t} \\ \frac{d v_C}{d_t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1-d}{nL_{p1}} \\ \frac{1-d}{nC} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{Lp1} \\ v_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{d}{L_{p1}} \\ 0 \end{bmatrix} v_{s1} \quad (2.22)$$

De (2.22) se obtienen las ecuaciones extendidas promediadas para la corriente del inductor y para el voltaje del capacitor:

$$\frac{di_{Lp1}}{dt} = \frac{d-1}{nL_{p1}} v_C + \frac{d}{L_{p1}} v_{s1} \quad (2.23)$$

$$\frac{dv_C}{dt} = \frac{1-d}{nC} i_{Lp1} - \frac{v_C}{R} \quad (2.24)$$

Para linealizar (2.23) y (2.24) se perturban las variables involucradas, considerando:

$$d = D + \hat{d} \quad (2.25)$$

$$v_{s1} = V_{s1} + \hat{v}_{s1} \quad (2.26)$$

$$i_{Lp1} = I_{Lp1} + \hat{i}_{Lp1} \quad (2.27)$$

$$\hat{i}_{Lp1} = I_{Lp1} + \hat{i}_{Lp1} \quad (2.28)$$

Las ecuaciones (2.25) - (2.28) son aplicadas a (2.23) y (2.24) para obtener las ecuaciones promediadas linealizadas:

$$\begin{aligned} \frac{dI_{Lp1}}{dt} + \frac{d\hat{i}_{Lp1}}{dt} &= \frac{D\hat{v}_C}{nL_{p1}} + \frac{DV_C}{nL_{p1}} + \frac{\hat{d}V_C}{nL_{p1}} + \frac{\hat{d}\hat{v}_C}{nL_{p1}} - \frac{V_C}{nL_{p1}} - \frac{\hat{v}_C}{nL_{p1}} + \frac{DV_{s1}}{L_{p1}} \\ &\quad + \frac{D\hat{V}_{s1}}{L_{p1}} + \frac{\hat{d}V_{s1}}{L_{p1}} + \frac{\hat{d}\hat{v}_{s1}}{L_{p1}} \end{aligned} \quad (2.29)$$

$$\begin{aligned} \frac{dV_C}{dt} + \frac{d\hat{v}_C}{dt} &= -\frac{D\hat{i}_{Lp1}}{nC} - \frac{DI_{Lp1}}{nC} - \frac{\hat{d}I_{Lp1}}{nC} - \frac{\hat{d}\hat{i}_{Lp1}}{nC} + \frac{I_{Lp1}}{nC} + \frac{\hat{i}_{Lp1}}{nC} - \frac{V_C}{RC} \\ &\quad - \frac{\hat{v}_C}{RC} \end{aligned} \quad (2.30)$$

De (2.29) y (2.30) se obtiene el modelo en CD y el modelo en CA.

El modelo en CD es el siguiente:

$$0 = \frac{DV_C}{nL_{p1}} - \frac{V_C}{nL_{p1}} + \frac{DV_{s1}}{L_{p1}} \quad (2.31)$$

$$0 = -\frac{DI_{Lp1}}{nC} + \frac{I_{Lp1}}{nC} - \frac{V_c}{RC} \quad (2.32)$$

El modelo en CA es el siguiente:

$$\frac{d\hat{i}_{Lp1}}{dt} = \frac{D\hat{v}_c}{nL_{p1}} + \frac{\hat{d}V_c}{nL_{p1}} - \frac{\hat{v}_c}{nL_{p1}} + \frac{\hat{d}V_{s1}}{L_{p1}} + \frac{D\hat{v}_{s1}}{L_{p1}} \quad (2.33)$$

$$\frac{d\hat{v}_c}{dt} = -\frac{D\hat{i}_{Lp1}}{nC} - \frac{\hat{d}I_{Lp1}}{nC} + \frac{\hat{i}_{Lp1}}{nC} - \frac{\hat{v}_c}{RC} \quad (2.34)$$

El modelo en CA expresado en forma matricial es:

$$\begin{bmatrix} \frac{d\hat{i}_{Lp1}}{dt} \\ \frac{d\hat{v}_c}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{D-1}{nL_{p1}} \\ \frac{1-D}{nC} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_{Lp1} \\ \hat{v}_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{D}{L_{p1}} \\ 0 \end{bmatrix} \hat{v}_{s1} + \begin{bmatrix} \frac{V_c}{nL_{p1}} + \frac{V_{s1}}{L_{p1}} \\ -\frac{I_{Lp1}}{nC} \end{bmatrix} \hat{d} \quad (2.35)$$

Para obtener las funciones de transferencia del sistema, se utiliza:

$$\frac{X}{\hat{d}} = [sI - A]^{-1}C \quad (2.36)$$

De la matriz (2.35) se obtienen los elementos necesarios para desarrollar (2.36):

$$\frac{X}{\hat{d}} = \begin{bmatrix} \frac{d\hat{i}_{Lp1}}{dt} \\ \frac{d\hat{v}_c}{dt} \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & \frac{D-1}{nL_{p1}} \\ \frac{1-D}{nC} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

$$C = \begin{bmatrix} \frac{V_C}{nL_{p1}} + \frac{V_{s1}}{L_{p1}} \\ -\frac{I_{Lp1}}{nC} \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

Y la matriz identidad:

$$sI = \begin{bmatrix} s & 0 \\ 0 & s \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

Para desarrollar (2.36), se utilizaron las matrices (2.38) - (2.40) y utilizando el software MATLAB para simplificar los cálculos, se obtuvo:

$$\frac{\hat{v}_C}{\hat{d}} = \frac{-nL_{p1}RI_{Lp1}s - DRV_C - nDRV_{s1} + V_C R + nRV_{s1}}{n^2L_{p1}RCs^2 + n^2L_{p1}s + D^2R - 2DR + R} \quad (2.41)$$

Esta ecuación es la función de transferencia para controlar el voltaje de salida cuando el interruptor S_{w1} conmuta.

Ahora considerando al segundo interruptor se utiliza la ilustración 14, que muestra el circuito equivalente cuando el interruptor S_{w2} se encuentra encendido.

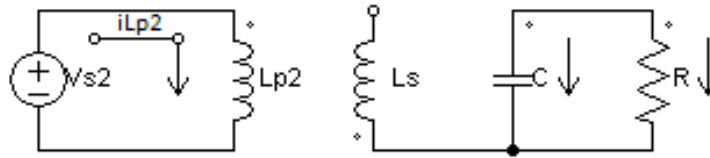


Ilustración 14 - Interruptor S_{w2} encendido, modo de operación 1 de la topología.

Las ecuaciones que describen el comportamiento del circuito de la ilustración 14 son descritas a continuación.

$$-V_{s2} + V_{Lp2} = 0 \quad (2.42)$$

$$-V_{s2} + L_{p2} \frac{di_{Lp2}}{dt} = 0 \quad (2.43)$$

$$\frac{d_{Li_{p2}}}{dt} = \frac{V_{s2}}{L_{p2}} \quad (2.44)$$

$$-i_C - i_R = 0 \quad (2.45)$$

$$C \frac{dv_C}{dt} + \frac{v_C}{R} = 0 \quad (2.46)$$

$$\frac{dv_C}{dt} = -\frac{v_C}{RC} \quad (2.47)$$

Las ecuaciones (2.42) - (2.44) corresponden al análisis de la malla del lado primario del circuito de la ilustración 14. Las ecuaciones (2.45) - (2.47) corresponden al análisis del nodo del lado secundario del circuito de la ilustración 14

La ilustración 15 muestra el circuito equivalente cuando el interruptor S_{w2} se encuentra apagado.

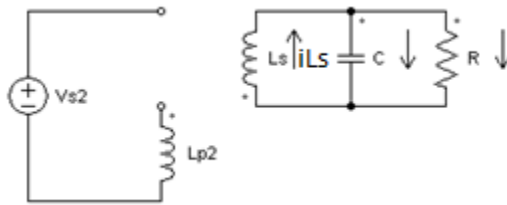


Ilustración 15 - Interruptor S_{w2} apagado, modo de operación 1 de la topología.

Las ecuaciones que describen el comportamiento del circuito de la ilustración 15 son escritas a continuación.

$$v_{L_s} + v_C = 0 \quad (2.48)$$

$$L_s \frac{di_{L_s}}{dt} = -v_C \quad (2.49)$$

$$\frac{di_{L_s}}{dt} = -\frac{v_C}{L_s} \quad (2.50)$$

$$i_{L_s} = i_C + i_R \quad (2.51)$$

Aplicando (2.2) y (2.3) en (2.50) se obtiene:

$$\frac{di_{Lp2}}{dt} = -\frac{v_C}{nL_{p2}} \quad (2.52)$$

Sustituyendo iL_S por i_{Lp2} en (2.51) se obtiene:

$$\frac{1}{n}i_{Lp2} = C \frac{dv_C}{dt} + \frac{v_C}{R} \quad (2.53)$$

$$\frac{dv_C}{dt} = \frac{i_{Lp2}}{nC} - \frac{v_C}{RC} \quad (2.54)$$

Las ecuaciones (2.48) - (2.50) y (2.52) corresponden al análisis de la malla del secundario del circuito de la ilustración 15. Las ecuaciones (2.51), (2.53) y (2.54) corresponden al análisis del nodo del de salida del circuito de la ilustración 15.

Las ecuaciones de estado del interruptor S_{w2} cuando se encuentra encendido se obtienen de (2.44) y (2.47), esto es:

$$\begin{bmatrix} \frac{di_{Lp2}}{dt} \\ \frac{dv_C}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{Lp2} \\ v_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{p2}} \\ 0 \end{bmatrix} v_{s2} \quad (2.55)$$

Las ecuaciones de estado del interruptor S_{w2} cuando se encuentra apagado se obtienen de (2.51) y (2.54), esto es:

$$\begin{bmatrix} \frac{di_{Lp2}}{dt} \\ \frac{dv_C}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{nL_{p2}} \\ \frac{1}{nC} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{Lp2} \\ v_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} v_{s2} \quad (2.56)$$

Para obtener las matrices de estado promediadas del interruptor S_{w1} cuando se encuentra encendido y apagado, se utiliza (2.19).

La ecuación de estado promediada del interruptor S_{w2} cuando se encuentra encendido se obtiene (2.19) a (2.55):

$$\begin{bmatrix} \frac{d i_{Lp2}}{d t} \\ \frac{d v_C}{d t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{d}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{Lp2} \\ v_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{d}{L_{p2}} \\ 0 \end{bmatrix} v_{s2} \quad (2.57)$$

La ecuación de estado promediada del interruptor S_{w2} cuando se encuentra apagado se obtiene aplicando (2.19) a (2.56):

$$\begin{bmatrix} \frac{d i_{Lp2}}{d t} \\ \frac{d v_C}{d t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1-d}{nL_{p2}} \\ \frac{1-d}{nC} & -\frac{1-d}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{Lp2} \\ v_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} v_{s2} \quad (2.58)$$

De (2.57) y (2.58) se obtiene el sistema promediado:

$$\begin{bmatrix} \frac{d i_{Lp2}}{d t} \\ \frac{d v_C}{d t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1-d}{nL_{p2}} \\ \frac{1-d}{nC} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{Lp2} \\ v_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{d}{L_{p2}} \\ 0 \end{bmatrix} v_{s2} \quad (2.59)$$

De (2.59) se obtienen se obtienen las ecuaciones extendidas promediadas para la corriente del inductor y para el voltaje del capacitor:

$$\frac{d i_{Lp2}}{d t} = \frac{d-1}{nL_{p2}} v_C + \frac{d}{L_{p2}} v_{s2} \quad (2.60)$$

$$\frac{d v_C}{d t} = \frac{1-d}{nC} i_{Lp2} - \frac{v_C}{R} \quad (2.61)$$

Para linealizar (2.60) y (2.61) se perturban las variables involucradas. Las ecuaciones (2.25) - (2.28) son aplicadas a (2.60) y (2.61) para obtener las ecuaciones promediadas linealizadas:

$$\begin{aligned} \frac{dI_{Lp2}}{dt} + \frac{d\hat{i}_{Lp2}}{dt} = & \frac{D\hat{v}_c}{nL_{p2}} + \frac{DV_c}{nL_{p2}} + \frac{\hat{d}V_c}{nL_{p2}} + \frac{\hat{d}\hat{v}_c}{nL_{p2}} - \frac{V_c}{nL_{p2}} - \frac{\hat{v}_c}{nL_{p2}} + \frac{DV_{s2}}{L_{p2}} + \frac{D\hat{V}_{s2}}{L_{p2}} \\ & + \frac{\hat{d}V_{s2}}{L_{p2}} + \frac{\hat{d}\hat{v}_{s2}}{L_{p2}} \end{aligned} \quad (2.62)$$

$$\frac{dV_c}{dt} + \frac{d\hat{v}_c}{dt} = -\frac{D\hat{i}_{Lp2}}{nC} - \frac{DI_{Lp2}}{nC} - \frac{\hat{d}I_{Lp2}}{nC} - \frac{\hat{d}\hat{i}_{Lp2}}{nC} + \frac{I_{Lp2}}{nC} + \frac{\hat{i}_{Lp2}}{nC} - \frac{V_c}{RC} - \frac{\hat{v}_c}{RC} \quad (2.63)$$

De (2.62) y (2.63) se obtiene el modelo en CD y el modelo en CA.

El modelo en CD es el siguiente:

$$0 = \frac{DV_c}{nL_{p2}} - \frac{V_c}{nL_{p2}} + \frac{DV_{s2}}{L_{p2}} \quad (2.64)$$

$$0 = -\frac{DI_{Lp2}}{nC} + \frac{I_{Lp2}}{nC} - \frac{V_c}{RC} \quad (2.65)$$

El modelo en CA es el siguiente:

$$\frac{d\hat{i}_{Lp2}}{dt} = \frac{D\hat{v}_c}{nL_{p2}} + \frac{\hat{d}V_c}{nL_{p2}} - \frac{\hat{v}_c}{nL_{p2}} + \frac{\hat{d}V_{s2}}{L_{p2}} + \frac{D\hat{v}_{s2}}{L_{p2}} \quad (2.66)$$

$$\frac{d\hat{v}_c}{dt} = -\frac{D\hat{i}_{Lp2}}{nC} - \frac{\hat{d}I_{Lp2}}{nC} + \frac{\hat{i}_{Lp2}}{nC} - \frac{\hat{v}_c}{RC} \quad (2.67)$$

El modelo en CA expresado en forma matricial es:

$$\begin{bmatrix} \frac{d\hat{i}_{Lp2}}{dt} \\ \frac{d\hat{v}_c}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{D-1}{nL_{p2}} \\ \frac{1-D}{nC} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_{Lp2} \\ \hat{v}_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{D}{L_{p2}} \\ 0 \end{bmatrix} \hat{v}_{s2} + \begin{bmatrix} \frac{V_c}{nL_{p2}} + \frac{V_{s2}}{L_{p2}} \\ -\frac{I_{Lp2}}{nC} \end{bmatrix} \hat{d} \quad (2.68)$$

Para obtener las funciones de transferencia del sistema, se aplica (2.36) a (2.68).

De (2.68) se obtienen los elementos necesarios para (2.36):

$$\frac{X}{\hat{d}} = \begin{bmatrix} \frac{d\hat{i}_{Lp2}}{d_t} \\ \frac{d\hat{v}_c}{d_t} \end{bmatrix} \quad (2.69)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & \frac{D-1}{nL_{p2}} \\ \frac{1-D}{nC} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \quad (2.70)$$

$$C = \begin{bmatrix} \frac{V_C}{nL_{p2}} + \frac{V_{s2}}{L_{p2}} \\ -\frac{I_{Lp2}}{nC} \end{bmatrix} \quad (2.71)$$

Para desarrollar (2.36), se utilizaron las matrices (2.40), (2.69) - (2.71) y utilizando el software MATLAB para simplificar los cálculos, la función de transferencia resultante es:

$$\frac{\hat{v}_c}{\hat{d}} = \frac{-nL_{p2}RI_{Lp2}s - DRV_C - nDRV_{s2} + V_C R + nRV_{s2}}{n^2L_{p2}RCs^2 + n^2L_{p2}s + D^2R - 2DR + R} \quad (2.72)$$

2.4.2 Análisis para el control del voltaje de salida, modo de operación 2

Se analiza este modo de operación considerando el circuito equivalente mostrado en la ilustración 10. En este modo la batería es cargada por una de las fuentes y se suministra potencia a la carga; para el análisis del control de voltaje de este modo de operación se tomó como fuente de alimentación a V_{s1} , por lo tanto, el interruptor que controla la transferencia de energía es S_{w1} .

La ilustración 16 muestra el circuito equivalente cuando el interruptor S_{w1} se encuentra encendido.

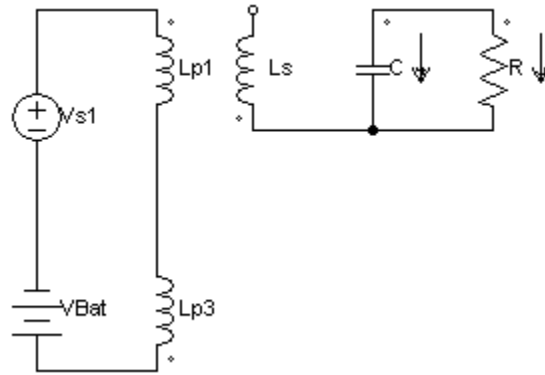


Ilustración 16 - Interruptor Sw1 encendido, modo de operación 2 de la topología.

Cuando el interruptor S_{w1} se encuentra encendido, se genera un voltaje de entrada equivalente y una inductancia equivalente, cuyo circuito es mostrado en la ilustración 17:

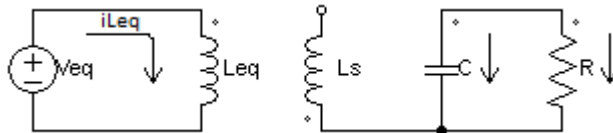


Ilustración 17 - Circuito equivalente cuando el interruptor Sw1 está encendido, modo de operación 2 de la topología.

La relación entre los inductores L_{p1} y L_{p3} se muestra en la siguiente ecuación:

$$\frac{L_{p3}}{L_{p1}} = \left(\frac{N_{p3}}{N_{p1}}\right)^2 \quad (2.73)$$

La inductancia es proporcional al número de vueltas del inductor elevado al cuadrado, es decir:

$$L_{p1} = k(N_{p1})^2 \quad (2.74)$$

K es el coeficiente de acoplamiento, es la medida del grado en que el flujo producido por una bobina enlaza a la otra, ($0 \leq k \leq 1$).

Cuando $k = 1$, las bobinas se encuentran perfectamente acopladas.

Cuando $k = 0$, las bobinas no están acopladas.

Para la topología propuesta, se considera que $k = 1$, un acoplamiento perfecto entre la bobina del primario utilizado en este modo de operación y la bobina de la batería.

La inductancia equivalente entre L_{p1} y L_{p3} está dada por la ecuación:

$$L_{eq} = k(N_{p1} - N_{p3})^2 \quad (2.75)$$

Considerando que:

$$N_{p3} = NN_{p1} \quad (2.76)$$

Utilizando (2.74) y (2.76) en (2.75) se obtiene:

$$L_{eq} = k(N_{p1} - NN_{p1})^2 \quad (2.77)$$

$$L_{eq} = kN_{p1}^2(1 - N)^2 \quad (2.78)$$

$$L_{eq} = L_{p1}(1 - N)^2 \quad (2.79)$$

La ecuación (2.79) es la inductancia equivalente formada por la inductancia del primario activo y la batería, esto para el modo de operación 2 cuando el interruptor se encuentra cerrado.

El voltaje equivalente es:

$$V_{eq} = V_{s1} - V_{Bat} \quad (2.80)$$

Retomando el circuito equivalente mostrado en la ilustración 17 y considerando a V_{eq} y a L_{eq} , se procede al análisis cuando el interruptor S_{w1} se encuentra encendido. Las ecuaciones que describen el comportamiento del circuito de la ilustración 17 son descritas a continuación.

$$-V_{eq} + V_{Leq} = 0 \quad (2.81)$$

$$-V_{eq} + L_{eq} \frac{di_{Leq}}{dt} = 0 \quad (2.82)$$

$$\frac{d_{L_{ieq}}}{d_t} = \frac{V_{eq}}{L_{eq}} \quad (2.83)$$

$$C \frac{d_{v_C}}{d_t} + \frac{v_C}{R} = 0 \quad (2.84)$$

$$\frac{d_{v_C}}{d_t} = -\frac{v_C}{RC} \quad (2.85)$$

Las ecuaciones (2.81) - (2.83) corresponden al análisis de la malla del lado primario del circuito de la ilustración 17. Las ecuaciones (2.84) y (2.85) corresponden al análisis del nodo del lado secundario del circuito de la ilustración 17.

La ilustración 18 muestra el circuito equivalente cuando el interruptor S_{w1} se encuentra apagado.

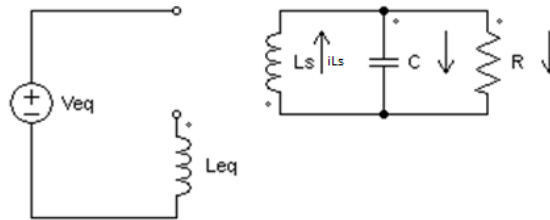


Ilustración 18 - Interruptor S_{w1} apagado, modo de operación 2 de la topología.

Las ecuaciones que describen el comportamiento del circuito de la ilustración 18 son descritas a continuación.

$$v_{L_s} + v_C = 0 \quad (2.86)$$

$$L_s \frac{d_{i_{L_s}}}{d_t} = -v_C \quad (2.87)$$

$$\frac{d_{i_{L_s}}}{d_t} = -\frac{v_C}{L_s} \quad (2.88)$$

Aplicando (2.2) y (2.3) en (2.88) teniendo en cuenta que para este modo de operación L_p fue sustituida por la inductancia equivalente L_{eq} calculada previamente, se obtiene la ecuación (2.89)

$$\frac{di_{Leq}}{dt} = -\frac{v_C}{nL_{eq}} \quad (2.89)$$

$$i_{LS} = i_C + i_R \quad (2.90)$$

Sustituyendo i_{LS} por i_{Leq} en la ecuación (2.90):

$$\frac{1}{n}i_{Leq} = C \frac{dv_C}{dt} + \frac{v_C}{R} \quad (2.91)$$

$$\frac{dv_C}{dt} = \frac{i_{Leq}}{nC} - \frac{v_C}{RC} \quad (2.92)$$

Las ecuaciones (2.86) - (2.89) corresponden al análisis de la malla del lado izquierdo del secundario del circuito de la ilustración 18. Las ecuaciones (2.90) - (2.92) corresponden al análisis del nodo de salida del circuito de la ilustración 18.

Las ecuaciones de estado del interruptor S_{w1} cuando se encuentra encendido se obtienen de (2.83) y (2.85), esto es:

$$\begin{bmatrix} \frac{di_{Leq}}{dt} \\ \frac{dv_C}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{Leq} \\ v_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{eq}} \\ 0 \end{bmatrix} v_{eq} \quad (2.93)$$

Las ecuaciones de estados del interruptor S_{w1} cuando se encuentra apagado se obtienen de (2.88) y (2.92), esto es:

$$\begin{bmatrix} \frac{di_{Leq}}{dt} \\ \frac{dv_C}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{nL_{eq}} \\ \frac{1}{nC} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{Leq} \\ v_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} v_{eq} \quad (2.94)$$

Para obtener las ecuaciones de estado promediadas del interruptor S_{w1} cuando se encuentra encendido y apagado, se utiliza la fórmula (2.19).

La ecuación de estado promediada del interruptor S_{w1} cuando se encuentra encendido se obtiene aplicando (2.19) a (2.93):

$$\begin{bmatrix} \frac{d i_{Leq}}{d_t} \\ \frac{d v_C}{d_t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{d}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{Leq} \\ v_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{d}{L_{eq}} \\ 0 \end{bmatrix} v_{eq} \quad (2.95)$$

La ecuación de estado promediada del interruptor S_{w1} cuando se encuentra apagado se obtiene aplicando (2.19) a (2.94):

$$\begin{bmatrix} \frac{d i_{Leq}}{d_t} \\ \frac{d v_C}{d_t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1-d}{nL_{eq}} \\ \frac{1-d}{nC} & -\frac{1-d}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{Leq} \\ v_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} v_{eq} \quad (2.96)$$

De (2.95) y (2.96) se obtiene el sistema promediado:

$$\begin{bmatrix} \frac{d i_{Leq}}{d_t} \\ \frac{d v_C}{d_t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1-d}{nL_{eq}} \\ \frac{1-d}{nC} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{Leq} \\ v_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{d}{L_{eq}} \\ 0 \end{bmatrix} v_{eq} \quad (2.97)$$

De (2.97) se obtienen las ecuaciones promediadas para la corriente del inductor y para el voltaje del capacitor:

$$\frac{d i_{Leq}}{d_t} = \frac{d-1}{nL_{eq}} v_C + \frac{d}{L_{eq}} v_{eq} \quad (2.98)$$

$$\frac{d v_C}{d_t} = \frac{1-d}{nC} i_{Leq} - \frac{v_C}{R} \quad (2.99)$$

Para linealizar (2.98) y (2.99) se perturban las variables involucradas. Las ecuaciones (2.25) - (2.28) son aplicadas a (2.98) y (2.99) para obtener las ecuaciones promediadas linealizadas:

$$\frac{d_{I_{Leq}}}{d_t} + \frac{d_{\hat{i}_{Leq}}}{d_t} = \frac{D\hat{v}_C}{nL_{eq}} + \frac{DV_C}{nL_{eq}} + \frac{\hat{d}V_C}{nL_{eq}} + \frac{\hat{d}\hat{v}_C}{nL_{eq}} - \frac{V_C}{nL_{eq}} - \frac{\hat{v}_C}{nL_{eq}} + \frac{DV_{eq}}{L_{eq}} + \frac{D\widehat{V}_{eq}}{L_{eq}} + \frac{\hat{d}V_{eq}}{L_{eq}} + \frac{\hat{d}\hat{v}_{eq}}{L_{eq}} \quad (2.100)$$

$$\frac{d_{V_C}}{d_t} + \frac{d_{\hat{v}_C}}{d_t} = -\frac{D\hat{i}_{Leq}}{nC} - \frac{DI_{Leq}}{nC} - \frac{\hat{d}I_{Leq}}{nC} - \frac{\hat{d}\hat{i}_{Leq}}{nC} + \frac{I_{Leq}}{nC} + \frac{\hat{i}_{Leq}}{nC} - \frac{V_C}{RC} - \frac{\hat{v}_C}{RC} \quad (2.101)$$

De (2.100) y (2.101) se obtiene el modelo en CD y el modelo en CA.

El modelo en CD es el siguiente:

$$0 = \frac{DV_C}{nL_{eq}} - \frac{V_C}{nL_{eq}} + \frac{DV_{eq}}{L_{eq}} \quad (2.102)$$

$$0 = -\frac{DI_{Leq}}{nC} + \frac{I_{Leq}}{nC} - \frac{V_C}{RC} \quad (2.103)$$

El modelo en CA es el siguiente:

$$\frac{d\hat{i}_{Leq}}{d_t} = \frac{D\hat{v}_C}{nL_{eq}} + \frac{\hat{d}V_C}{nL_{eq}} - \frac{\hat{v}_C}{nL_{eq}} + \frac{\hat{d}V_{eq}}{L_{eq}} + \frac{D\hat{v}_{eq}}{L_{eq}} \quad (2.104)$$

$$\frac{d\hat{v}_C}{d_t} = -\frac{D\hat{i}_{Leq}}{nC} - \frac{\hat{d}I_{Leq}}{nC} + \frac{\hat{i}_{Leq}}{nC} - \frac{\hat{v}_C}{RC} \quad (2.105)$$

El modelo en CA expresado en forma matricial es:

$$\begin{bmatrix} \frac{d\hat{i}_{Leq}}{d_t} \\ \frac{d\hat{v}_C}{d_t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{D-1}{nL_{eq}} \\ \frac{1-D}{nC} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_{Leq} \\ \hat{v}_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{D}{L_{eq}} \\ 0 \end{bmatrix} \hat{v}_{eq} + \begin{bmatrix} \frac{V_C}{nL_{eq}} + \frac{V_{eq}}{L_{eq}} \\ -\frac{I_{Leq}}{nC} \end{bmatrix} \hat{d} \quad (2.106)$$

Para obtener las funciones de transferencia del sistema, se aplica (2.36) a (2.106).

De (2.106) se obtienen los elementos necesarios para (2.36):

$$\frac{X}{\hat{d}} = \begin{bmatrix} \frac{deq}{d_t} \\ \frac{d\hat{v}_c}{d_t} \end{bmatrix} \quad (2.107)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & \frac{D-1}{nL_{eq}} \\ \frac{1-D}{nC} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \quad (2.108)$$

$$C = \begin{bmatrix} \frac{V_c}{nL_{eq}} + \frac{V_{eq}}{L_{eq}} \\ -\frac{I_{Lp2}}{nC} \end{bmatrix} \quad (2.109)$$

Para desarrollar (2.36), se utilizaron las matrices (2.40), (2.107) - (2.109) y utilizando el software MATLAB para simplificar los cálculos, se obtuvo:

$$\frac{\hat{v}_c}{\hat{d}} = \frac{-nL_{eq}RI_{Leq}s - DRV_c - nDRV_{eq} + V_cR + nRV_{eq}}{n^2L_{eq}RCs^2 + n^2L_{eq}s + D^2R - 2DR + R} \quad (2.110)$$

2.4.3 Análisis para el control del voltaje de salida, modo de operación 3

Se analiza este modo de operación considerando el circuito equivalente mostrado en la ilustración 11. En este modo la batería es la encargada de suministrar potencia a la carga, y los interruptores S_{w3} y S_{w5} controlan la transferencia de energía. Ambos interruptores comparten la misma señal de conmutación.

La ilustración 19 muestra el circuito equivalente cuando los interruptores S_{w3} y S_{w5} se encuentran encendidos.

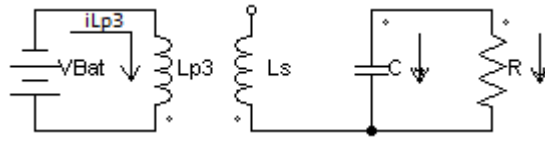


Ilustración 19 - Interruptores Sw3 y Sw5 encendidos, modo de operación 3 de la topología.

Las ecuaciones que describen el comportamiento del circuito de la ilustración 19 son descritas a continuación.

$$-V_{Bat} + V_{Lp3} = 0 \quad (2.111)$$

$$-V_{Bat} + L_{p3} \frac{di_{Lp3}}{dt} = 0 \quad (2.112)$$

$$\frac{dLi_{p3}}{dt} = \frac{V_{Bat}}{L_{p3}} \quad (2.113)$$

$$-i_C - i_R = 0 \quad (2.114)$$

$$C \frac{dv_C}{dt} + \frac{v_C}{R} = 0 \quad (2.115)$$

$$\frac{dv_C}{dt} = -\frac{v_C}{RC} \quad (2.116)$$

Las ecuaciones (2.111) - (2.113) corresponden al análisis de la malla del lado primario del circuito de la ilustración 19. Las ecuaciones (2.114) - (2.116) corresponden al análisis del nodo del lado secundario del circuito de la ilustración 19.

La ilustración 20 muestra el circuito equivalente cuando los interruptores Sw3 y Sw5 se encuentran apagados.

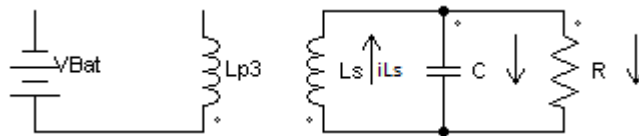


Ilustración 20 - Interruptores Sw3 y Sw5 apagados, modo de operación 3 de la topología.

Las ecuaciones que describen el comportamiento del circuito de la ilustración 20 son descritas a continuación.

$$v_{L_s} + v_c = 0 \quad (2.117)$$

$$L_s \frac{d i_{L_s}}{d t} = -v_c \quad (2.118)$$

$$\frac{d i_{L_s}}{d t} = -\frac{v_c}{L_s} \quad (2.119)$$

Aplicando (2.2) y (2.3) en (2.119) se obtiene:

$$\frac{d i_{L_{p3}}}{d t} = -\frac{v_c}{n L_{p3}} \quad (2.120)$$

$$i_{L_s} = i_c + i_R \quad (2.121)$$

Sustituyendo i_{L_s} por $i_{L_{p3}}$ en (2.121) se obtiene:

$$\frac{1}{n} i_{L_{p3}} = C \frac{d v_c}{d t} + \frac{v_c}{R} \quad (2.122)$$

$$\frac{d v_c}{d t} = \frac{i_{L_{p3}}}{n C} - \frac{v_c}{R C} \quad (2.123)$$

Las ecuaciones (2.117) - (2.120) corresponden al análisis de la malla del secundario del circuito de la ilustración 20. Las ecuaciones (2.121) - (2.123) corresponden al análisis del nodo de salida del circuito de la ilustración 20.

Las ecuaciones de estado de los interruptores S_{w3} y S_{w5} cuando se encuentran encendidos se obtienen de (2.113) y (2.116), esto es:

$$\begin{bmatrix} \frac{d i_{Lp3}}{d t} \\ \frac{d v_C}{d t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{Lp3} \\ v_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{Lp3} \\ 0 \end{bmatrix} v_{Bat} \quad (2.124)$$

Las ecuaciones de estado del interruptor S_{w1} cuando se encuentra apagado se obtienen de (2.120) y (2.123), esto es:

$$\begin{bmatrix} \frac{d i_{Lp3}}{d t} \\ \frac{d v_C}{d t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{nLp3} \\ \frac{1}{nC} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{Lp3} \\ v_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} v_{Bat} \quad (2.125)$$

Para obtener las ecuaciones de estado promediadas de los interruptores S_{w3} y S_{w5} cuando se encuentran encendidos y apagados, se utiliza (2.19).

La matriz de estado promediada de los interruptores S_{w3} y S_{w5} cuando se encuentran encendidos se obtiene aplicando (2.19) a la matriz (2.124):

$$\begin{bmatrix} \frac{d i_{Lp3}}{d t} \\ \frac{d v_C}{d t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{d}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{Lp3} \\ v_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{d}{Lp3} \\ 0 \end{bmatrix} v_{Bat} \quad (2.126)$$

La ecuación de estado promediada de los interruptores S_{w3} y S_{w5} cuando se encuentran apagados se obtiene aplicando (2.19) a (2.125):

$$\begin{bmatrix} \frac{d i_{Lp3}}{d t} \\ \frac{d v_C}{d t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1-d}{nLp3} \\ \frac{1-d}{nC} & -\frac{1-d}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{Lp3} \\ v_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} v_{Bat} \quad (2.127)$$

De (2.126) y (2.127) se obtiene el sistema promediado final:

$$\begin{bmatrix} \frac{d i_{Lp3}}{d t} \\ \frac{d v_c}{d t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1-d}{nL_{p3}} \\ \frac{1-d}{nC} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{Lp3} \\ v_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{d}{L_{p3}} \\ 0 \end{bmatrix} v_{Bat} \quad (2.128)$$

De (2.128) se obtienen las ecuaciones extendidas promediadas para la corriente del inductor y para el voltaje del capacitor:

$$\frac{d i_{Lp3}}{d t} = \frac{d-1}{nL_{p3}} v_c + \frac{d}{L_{p3}} v_{Bat} \quad (2.129)$$

$$\frac{d v_c}{d t} = \frac{1-d}{nC} i_{Lp3} - \frac{v_c}{R} \quad (2.130)$$

Para linealizar (2.129) y (2.130) se perturban las variables involucradas. Las ecuaciones (2.25) - (2.28) son aplicadas a (2.129) y (2.130) para obtener las ecuaciones promediadas linealizadas:

$$\begin{aligned} \frac{d i_{Lp3}}{d t} + \frac{d \hat{i}_{Lp3}}{d t} &= \frac{D \hat{v}_c}{nL_{p3}} + \frac{D V_c}{nL_{p3}} + \frac{\hat{d} V_c}{nL_{p3}} + \frac{\hat{d} \hat{v}_c}{nL_{p3}} - \frac{V_c}{nL_{p3}} - \frac{\hat{v}_c}{nL_{p3}} + \frac{D V_{Bat}}{L_{p3}} \\ &+ \frac{D \hat{V}_{Bat}}{L_{p3}} + \frac{\hat{d} V_{Bat}}{L_{p3}} + \frac{\hat{d} \hat{v}_{Bat}}{L_{p3}} \end{aligned} \quad (2.131)$$

$$\frac{d v_c}{d t} + \frac{d \hat{v}_c}{d t} = -\frac{D \hat{i}_{Lp3}}{nC} - \frac{D I_{Lp3}}{nC} - \frac{\hat{d} I_{Lp3}}{nC} - \frac{\hat{d} \hat{i}_{Lp3}}{nC} + \frac{I_{Lp3}}{nC} + \frac{\hat{i}_{Lp3}}{nC} - \frac{V_c}{RC} - \frac{\hat{v}_c}{RC} \quad (2.132)$$

De (2.131) y (2.132) se obtiene el modelo en CD y el modelo en CA.

El modelo en CD es el siguiente:

$$0 = \frac{D V_c}{nL_{p3}} - \frac{V_c}{nL_{p3}} + \frac{D V_{Bat}}{L_{p3}} \quad (2.133)$$

$$0 = -\frac{D I_{Lp3}}{nC} + \frac{I_{Lp3}}{nC} - \frac{V_c}{RC} \quad (2.134)$$

El modelo en CA es el siguiente:

$$\frac{d\hat{i}_{Lp3}}{dt} = \frac{D\hat{v}_c}{nL_{p3}} + \frac{\hat{d}V_c}{nL_{p3}} - \frac{\hat{v}_c}{nL_{p3}} + \frac{\hat{d}V_{Bat}}{L_{p3}} + \frac{D\hat{v}_{Bat}}{L_{p3}} \quad (2.135)$$

$$\frac{d\hat{v}_c}{dt} = -\frac{D\hat{i}_{Lp3}}{nC} - \frac{\hat{d}I_{Lp3}}{nC} + \frac{\hat{i}_{Lp3}}{nC} - \frac{\hat{v}_c}{RC} \quad (2.136)$$

El sistema linealizado en forma matricial es:

$$\begin{bmatrix} \frac{d\hat{i}_{Lp3}}{dt} \\ \frac{d\hat{v}_c}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{D-1}{nL_{p3}} \\ \frac{1-D}{nC} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_{Lp3} \\ \hat{v}_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{D}{L_{p3}} \\ 0 \end{bmatrix} \hat{v}_{Bat} + \begin{bmatrix} \frac{V_c}{nL_{p3}} + \frac{V_{Bat}}{L_{p3}} \\ -\frac{I_{Lp3}}{nC} \end{bmatrix} \hat{d} \quad (2.137)$$

Para obtener las funciones de transferencia del sistema, se aplica (2.36) a (2.137).

De (2.137) se obtienen los elementos necesarios para (2.36):

$$\frac{X}{\hat{d}} = \begin{bmatrix} \frac{d\hat{i}_{Lp3}}{dt} \\ \frac{d\hat{v}_c}{dt} \end{bmatrix} \quad (2.138)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & \frac{D-1}{nL_{p3}} \\ \frac{1-D}{nC} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \quad (2.139)$$

$$C = \begin{bmatrix} \frac{V_c}{nL_{p3}} + \frac{V_{Bat}}{L_{p3}} \\ -\frac{I_{Lp3}}{nC} \end{bmatrix} \quad (2.140)$$

Para desarrollar (2.36), se utilizaron las ecuaciones (2.40), (2.138) - (2.140) y utilizando el software MATLAB para simplificar los cálculos, se obtiene:

$$\frac{\hat{v}_C}{\hat{d}} = \frac{-nL_{p3}RI_{Lp3}S - DRV_C - nDRV_{Bat} + V_C R + nRV_{Bat}}{n^2L_{p3}RCs^2 + n^2L_{p3}S + D^2R - 2DR + R} \quad (2.141)$$

Utilizando los parámetros de la Tabla 2.2 y las funciones de transferencia del voltaje de salida obtenidas, se realizó el análisis de estabilidad del sistema en Matlab y su herramienta SisoTool para simplificar el procedimiento; se analiza la estabilidad del sistema mediante los diagramas de magnitud y fase y la ubicación de los polos y ceros. Este análisis solo se realizó para un solo modo de operación, ya que los tres son muy similares.

Tabla 2.2 Parámetros de diseño del convertidor propuesto.

| Parámetro | Valor |
|----------------------------------|--------------|
| V_{s1} | 58V |
| V_{s2} | 58V |
| P_{max} del panel fotovoltaico | 60W |
| Frecuencia | 40KHz |
| V_{Bat} | 24V |
| ΔV_o | 1% |
| V_o | 48V |
| R | 38.4Ω |
| C | 32.9μF |
| L_{p1} y L_{p2} | 1.6mH |
| L_{p3} | 52.26μH |
| L_s | 1.6mH |
| D , modo de operación 1 | 0.45 |
| D , modo de operación 2 | 0.58 |
| D , modo de operación 3 | 0.6 |
| i_{Lp1} | 2.2A |
| i_{Lp2} | 2.9A |
| i_{Lp3} | 2.3A |

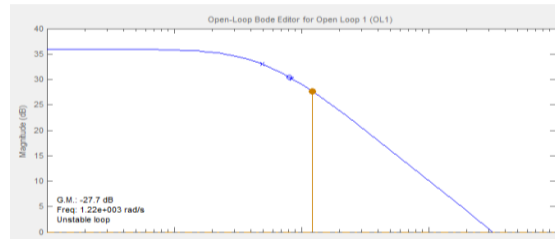


Ilustración 21 – Diagrama de Bode de la planta sin compensador, magnitud.

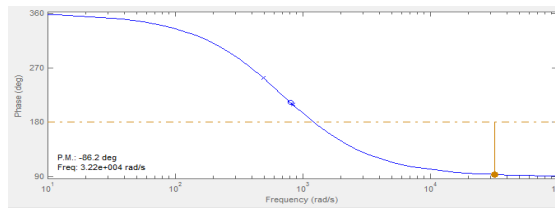


Ilustración 22 – Diagrama de Bode de la planta sin compensador, fase.

Se puede observar en las ilustraciones 21 y 22 que el criterio de estabilidad relativa del control clásico no se cumple sin compensador, ya que la naturaleza del convertidor Flyback es de fase no mínima.

Para controlar el sistema se propuso un compensador tipo PI cuya forma es:

$$PI = K_p + K_i \frac{1}{S} = \frac{K_p S + K_i}{S} \quad (2.142)$$

Entre las características de los compensadores tipo PI se incluyen una buena ganancia en CD y un ligero aumento en el ancho de banda.

El diagrama del compensador propuesto se muestra en la ilustración 26:

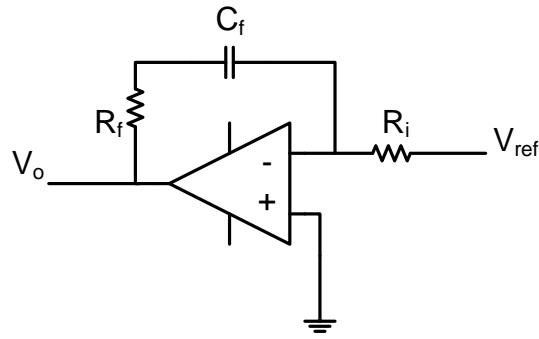


Ilustración 23 – Compensador propuesto para controlar el sistema.

La función de transferencia del compensador de la ilustración 23 se muestra en (2.143):

$$\frac{V_{ref}}{V_o} = \frac{R_f C_f S + 1}{R_i C_f S} \quad (2.143)$$

Este compensador tiene un polo en el origen y el cero se encuentra ubicado en $\frac{1}{R_f C_f}$

Los valores indicados en (2.144) - (2.145) fueron obtenidos al sintonizar el controlador:

$$R_f = 1.5K\Omega \quad (2.144)$$

$$R_i = 150K\Omega \quad (2.145)$$

$$C_f = 1\mu F \quad (2.146)$$

Con el compensador sintonizado, se analiza nuevamente la estabilidad del sistema, obteniendo los resultados mostrados en las ilustraciones 24, 25 y 26:

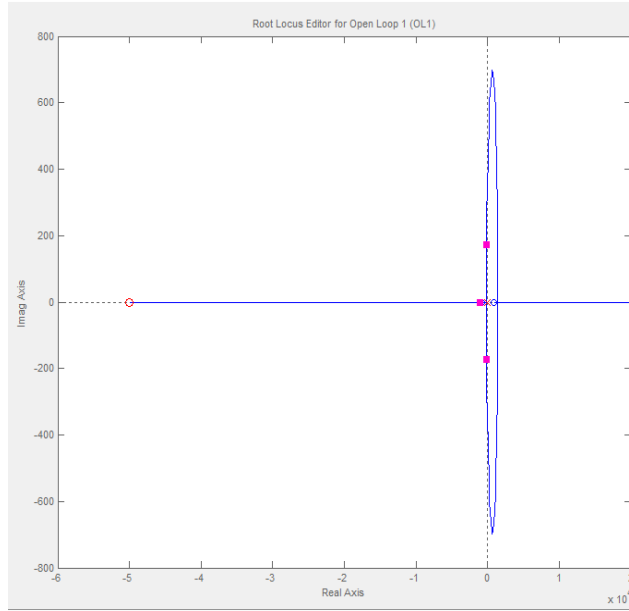


Ilustración 24 – Diagrama de Nyquist con compensador.

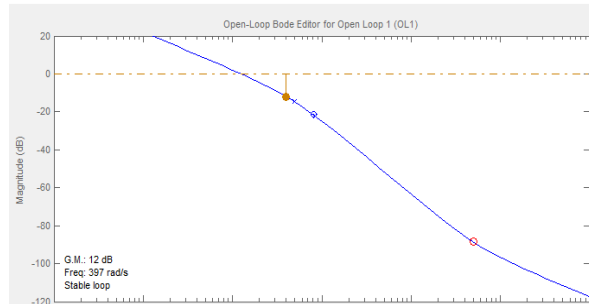


Ilustración 25 – Diagrama de Bode de la planta con compensador, magnitud.

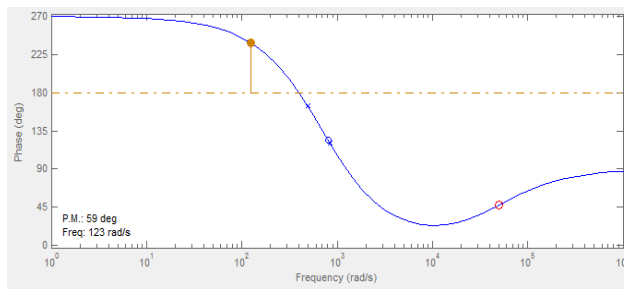


Ilustración 26 – Diagrama de Bode de la planta con compensador, fase.

En la ilustración 24 se aprecia que el sistema es estable y en las ilustraciones 25 y 26 se observa que el criterio de estabilidad relativa se cumple, sintonizando el controlador aún más, colocando el cero aproximadamente en 10Hz se obtiene una mejor respuesta, que se puede

observar en las ilustraciones 27, 28 y 29; esto en comparación con los resultados obtenidos del análisis de la planta sin compensador (ilustraciones 21 y 22) y en comparación con el análisis de la planta con el compensador propuesto sin sintonización (ilustraciones 24, 25 y 26), y en cuanto a que se obtiene un mayor ancho de banda y una mayor ganancia en CD.

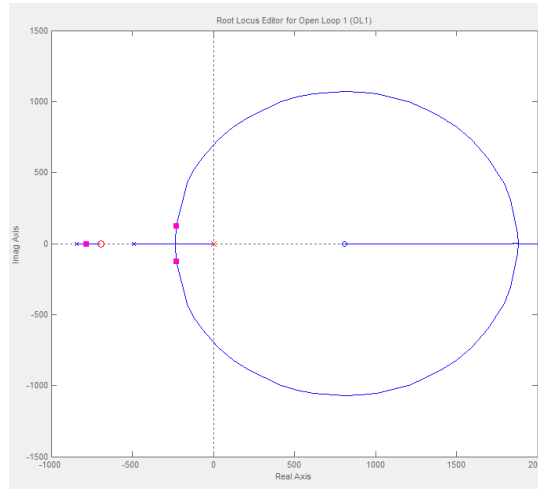


Ilustración 27 – Diagrama de Nyquist con ajuste en el compensador.

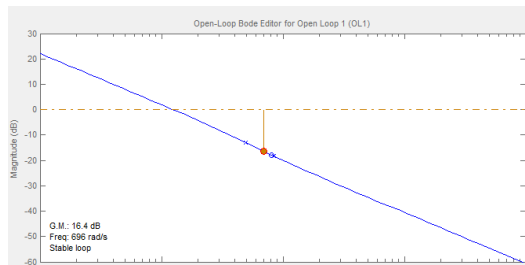


Ilustración 28 – Diagrama de Bode de la planta con ajuste en el compensador, magnitud.

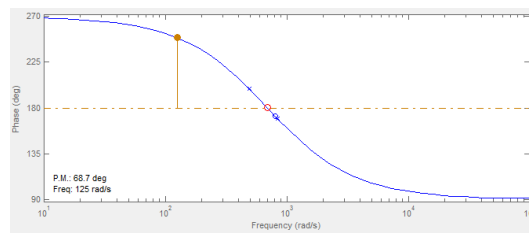


Ilustración 29 – Diagrama de Bode de la planta con ajuste en el compensador, fase.

El análisis de respuesta al escalón mostrado en la ilustración 30 verifica la estabilidad del sistema con el compensador propuesto, con un tiempo de respuesta de aproximadamente 20ms.

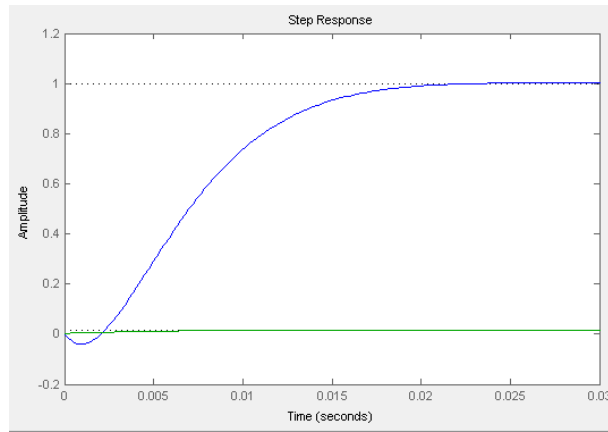


Ilustración 30 – Respuesta al escalón del sistema con el compensador modificado.

Es importante hacer notar que los valores obtenidos en la sintonización del controlador, (2.144) -(2.146) se aplicaron en los tres modos de operación. Lo anterior representa una ventaja en la topología presentada, y se puede verificar su comportamiento estable en la Tabla 2.3.

El control diseñado permite controlar el voltaje de salida para cada modo de operación de manera independiente, es decir, la ley de control propuesta no asegura su correcto funcionamiento y estabilidad al realizar el cambio de un modo de operación a otro; el diseño e implementación de dicha ley de control es aplicable a un trabajo futuro orientado a resolver dicha situación

“Convertidor CD/CD Multientradas para Aplicaciones en Energía Renovable”

Ing. Gabriela Lara-Salazar

Tabla 2.3 Comportamiento de los tres modos de operación de la planta con el compensador propuesto.

| Modo de operación | Valor de los elementos del compensador | Diagramas de Nyquist y Bode |
|-------------------|--|-----------------------------|
| 1 | $R_f = 1.5K\Omega$ $R_i = 150K\Omega$ $C_f = 1\mu F$ | |
| 2 | $R_f = 1.5K\Omega$ $R_i = 150K\Omega$ $C_f = 1\mu F$ | |
| 3 | $R_f = 1.5K\Omega$ $R_i = 150K\Omega$ $C_f = 1\mu F$ | |

2.5 Diseño del convertidor propuesto

Para calcular los elementos de la topología de este trabajo de se utilizan las ecuaciones (2.142) a (2.148):

$$R = \frac{v_o^2}{P} \quad (2.142)$$

$$C \geq \frac{D}{Rf \frac{\Delta v_o}{v_o}} \quad (2.143)$$

$$i_{LP} = \frac{V_s D}{(1-D)^2 R} \quad (2.144)$$

$$\Delta i_{LP} = \% i_L \quad (2.145)$$

$$L_p = \frac{V_s D}{\Delta i_L f} \quad (2.146)$$

$$L_{eq} = (1-N)^2 L_p \quad (2.147)$$

$$D = \frac{1}{\left(\frac{V_s}{V_o}\right) + 1} \quad (2.148)$$

Donde:

L_p es la inductancia del lado primario

L_{eq} es la inductancia equivalente entre L_{p1} y L_{p3}

D es el ciclo de trabajo

V_s es el voltaje de entrada

V_o es el voltaje de salida

f es la frecuencia de conmutación

R es la resistencia de carga

N es la relación de vueltas N_s/N_p

i_{LP} es la corriente del inductor del lado primario

Δi_{LP} es el rizo de corriente del inductor del lado primario

Los parámetros mostrados en la Tabla 2.2 fueron considerados para el diseño.

Capítulo 3. Simulaciones y Resultados Experimentales

3.1 Resumen

Para poder verificar el funcionamiento correcto de la idea propuesta para este trabajo de tesis, el convertidor fue diseñado y simulado.

Los parametros mostrados en la Tabla 2.2 fueron considerados para este propósito, dichos parametros fueron utilizados también para la implementación del prototipo y se realizaron pruebas a lazo abierto. Se utilizó una fuente de voltaje variable en sustitución de los paneles fotovoltaicos. La fuente utilizada puede proporcionar hasta 60V y hasta 6A a la salida. Con respecto a las baterías, las disponibles en el laboratorio son de 12V-24Ah ácido-plomo.

El convertidor fue simulado y probado en 3 diferentes modos de operación, y los resultados son descritos a continuación.

3.2 Simulación de la planta propuesta

Se realizó la simulación de la topología propuesta con el paquete PowerSim; las características de la simulación son las indicadas en la Tabla 2.2.

La planta fue simulada en sus tres modos de operación y son descritos a continuación.

3.2.1 Simulación del modo de operación 1

En este modo de operación, las fuentes V_{s1} y V_{s2} entregan energía a la carga; los interruptores S_{w1} y S_{w2} se encuentran conmutando de acuerdo a las señales de la ilustración 31. La señal superior corresponde al interruptor S_{w1} y la señal inferior corresponde al interruptor S_{w2} . La ilustración 32 muestra el voltaje de salida obtenido. La corriente de uno de los inductores primarios, la corriente del inductor de la batería y la corriente del inductor secundario son mostradas en la ilustración 33.

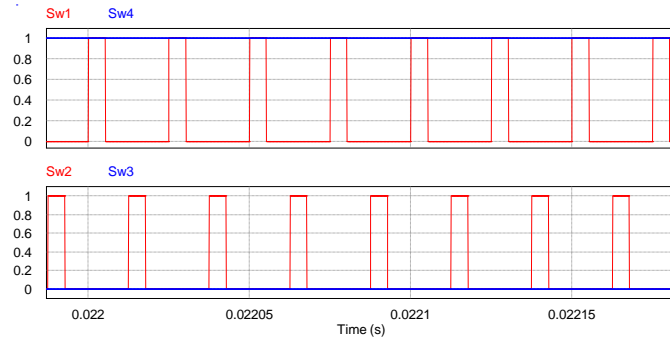


Ilustración 31 – Señales de control de los interruptores Sw1 y Sw2, modo de operación 1.

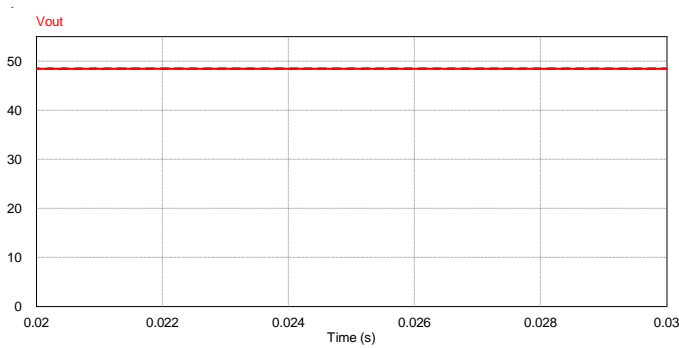


Ilustración 32 – Voltaje de salida, modo de operación 1.

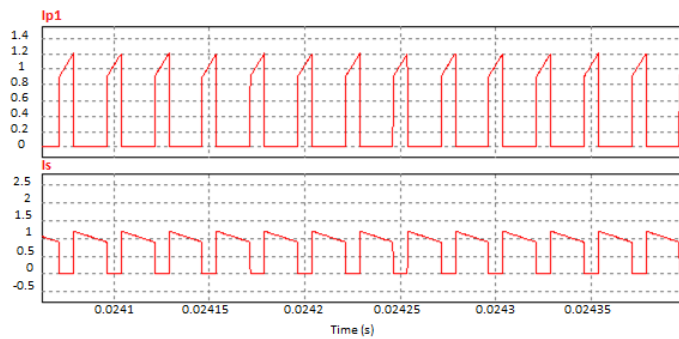


Ilustración 33 – Corriente del inductor primario 1 y corriente del inductor secundario (de arriba para abajo), modo de operación 1.

3.2.2. Simulación del modo de operación 2

En este modo de operación, la fuente V_{s1} carga la batería y provee energía a la carga. La señal de control para el interruptor S_{w1} se muestra en la ilustración 34. El voltaje de salida es mostrado en la ilustración 35. La corriente del inductor primario, la corriente del inductor de la batería y la corriente del inductor secundario son mostradas en la ilustración 36.

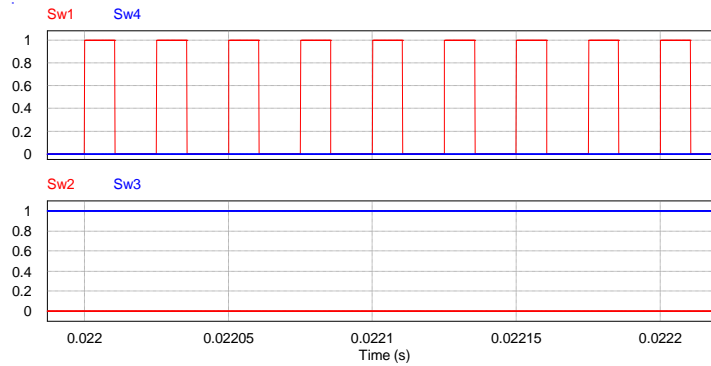


Ilustración 34 – Señal de control para el interruptor Sw1, modo de operación 2.

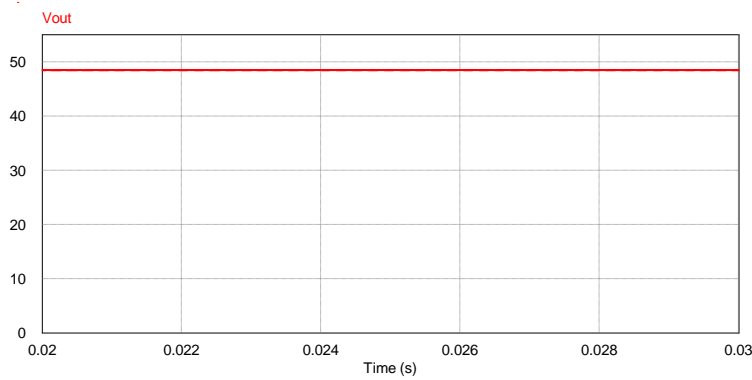


Ilustración 35 - Voltaje de salida, modo de operación 2.

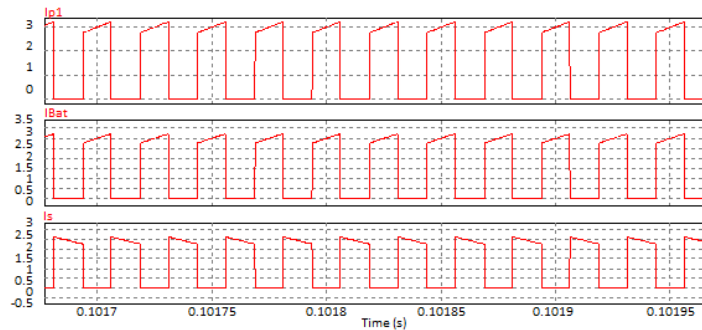


Ilustración 36 - Corriente del inductor primario, corriente del inductor de la batería y corriente del inductor secundario (de arriba para abajo), modo de operación 2.

3.2.3. Simulación del modo de operación 3

En este modo de operación la batería V_{Bat} entrega energía a la carga, los interruptores S_{w3} y S_{w5} se encuentran conmutando de acuerdo a la ilustración 37. El voltaje de salida es mostrado

en la ilustración 38. La corriente del inductor primario, la corriente del inductor de la batería y la corriente del inductor secundario son mostradas en la ilustración 39.

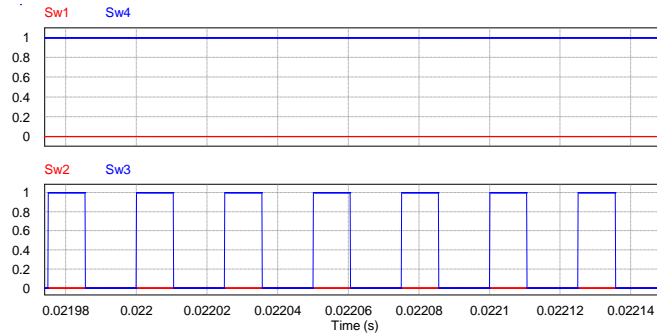


Ilustración 37 - Señales de control de los interruptores Sw3 y Sw5, modo de operación 3.

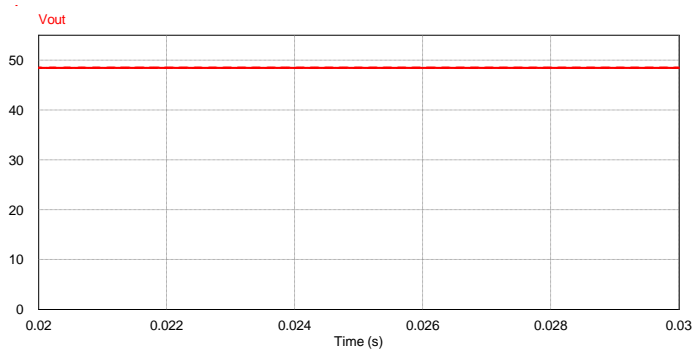


Ilustración 38 - Voltaje de salida, modo de operación 3.

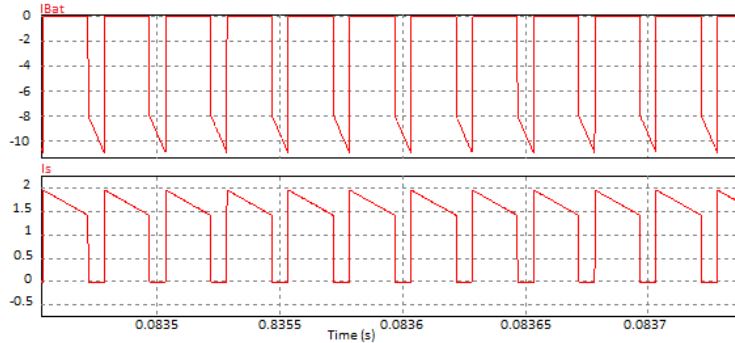


Ilustración 39 - Corriente del inductor de la batería y corriente del inductor secundario (de arriba para abajo), modo de operación 3.

3.3 Resultados experimentales en lazo abierto

El diseño de la planta propuesta considera tres modos de operación:

- Modo 1: V_{s1} y V_{s2} proveen energía a la carga.
- Modo 2: V_{s1} y V_{Bat} proveen energía a la carga, además, si V_{Bat} se encuentra descargada, V_{s1} la carga, solo si la demanda de energía por parte de la carga no excede su capacidad.
- Modo 3: V_{Bat} provee energía a la carga.

Para las **pruebas a lazo abierto**, se consideraron los siguientes modos de operación:

- Modo 1.a: V_{s1} – Entrega energía a la carga
- Modo 2.a: V_{s2} – Entrega energía a la carga
- Modo 3.a: V_{Bat} – Entrega energía a la carga

La Tabla 3.1 muestra los modos de operación para las pruebas a lazo abierto, así como el estado de los interruptores y las fuentes activas en cada uno de ellos.

Tabla 3.1 Modos de operación del convertidor propuesto para pruebas a lazo abierto

| Modo de operación | Fuentes activas | Interruptores | | | | |
|--|-----------------|---------------|----------|----------|----------|----------|
| | | S_{w1} | S_{w2} | S_{w3} | S_{w4} | S_{w5} |
| 1.a | V_{s1} | x | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 2.a | V_{s2} | 0 | x | 0 | 1 | 0 |
| 3.a | V_{Bat} | 0 | 0 | x | 1 | x |
| ‘x’ – Interruptor conmutando ‘1’ – Interruptor encendido ‘0’ – Interruptor apagado | | | | | | |

De acuerdo al diseño de la planta propuesta, 5 interruptores son utilizados para controlar los modos de operación, los interruptores S_{w1} , S_{w2} y S_{w4} tienen su propio impulsor, y los interruptores S_{w3} y S_{w5} comparten el mismo impulsor, esto para reducir el tamaño de la placa utilizada y el número de componentes empleados. Para su conmutación se utilizó una tarjeta FPGA Digilent Basys2, ya que, por sus características de diseño, ofrece lo necesario para poder implementar el PWM. Se consideró un arranque suave para no dañar los MOSFET

utilizados. La programación del PWM permite incrementar o decrementar el ciclo de trabajo de la señal, esto resultó muy útil para las primeras pruebas, ya que se necesitaba un ciclo de trabajo pequeño para asegurar el correcto funcionamiento de la planta. La ilustración 40 muestra la topología implementada.

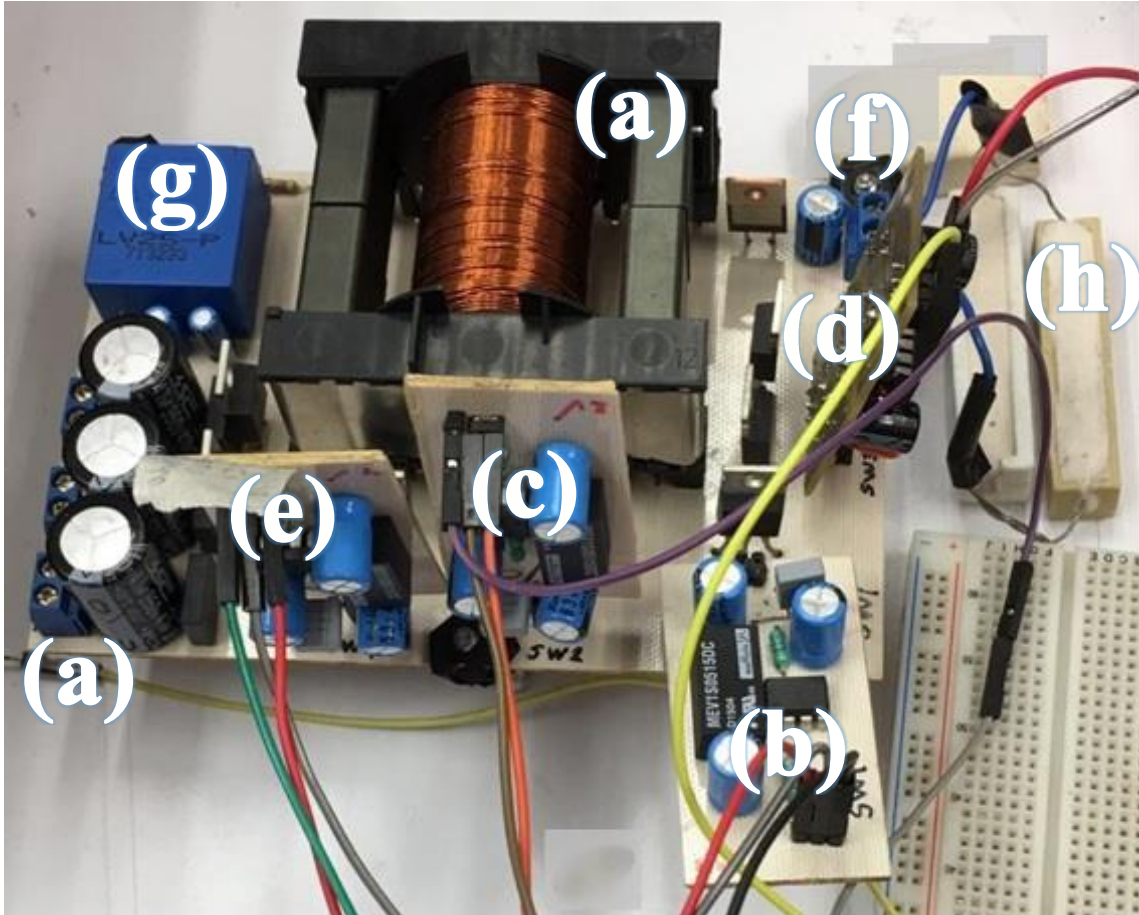


Ilustración 40 – Topología propuesta implementada.

Los elementos de la topología implementada (ilustración 40) se describen brevemente a continuación:

- a) Fuentes de entrada, V_{s1} , V_{s2} y V_{bat} .
- b) Impulsor del interruptor S_{w1} .
- c) Impulsor del interruptor S_{w2} .
- d) Impulsor de los interruptores S_{w3} y S_{w5} (compartido).

- e) Impulsor del interruptor S_{w4} .
- f) Salida, V_o .
- g) Sensor para el voltaje de salida, V_o .
- h) Carga conectada a la planta, 100Ω a $50W$.

Se verificó el funcionamiento de cada impulsor por separado para asegurar el correcto desempeño de los interruptores utilizados en los distintos modos de operación para las pruebas a lazo abierto. La señal del impulsor correspondiente al interruptor S_{w1} se muestra en la ilustración 41:

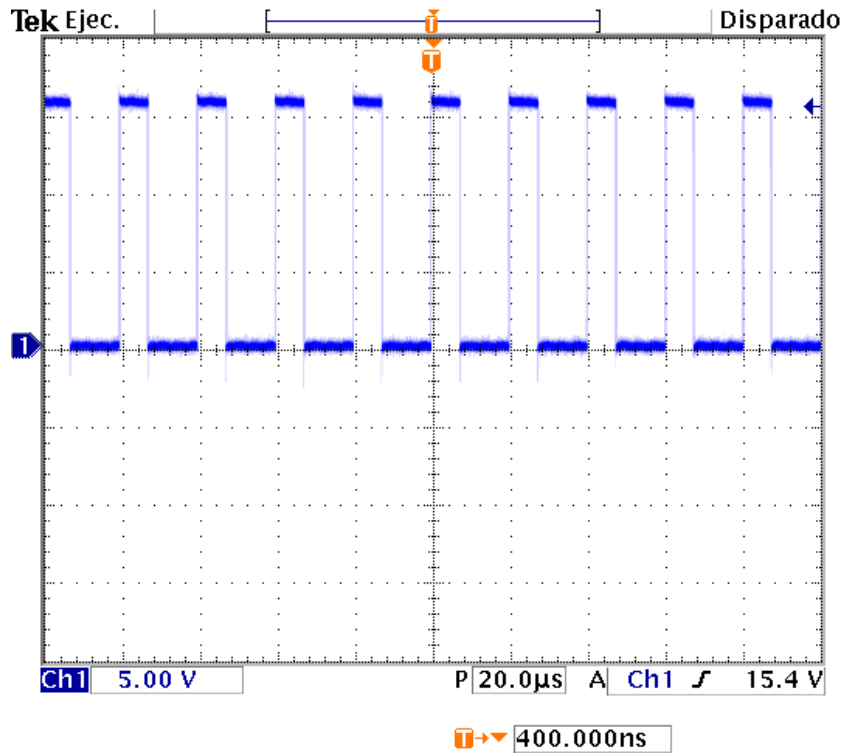


Ilustración 41 - Señal del impulsor del interruptor S_{w1} .

Las fuentes V_{s1} y V_{s2} representan paneles solares, para las pruebas a lazo abierto dichos paneles fueron sustituidos por una fuente de laboratorio de voltaje variable. El banco de baterías V_{Bat} igualmente fue sustituido para estas pruebas por una fuente de laboratorio de voltaje variable.

Con respecto a las inductancias acopladas utilizado se trabajó con cable calibre 21 y un solo núcleo de ferrita para las inductancias utilizadas, obteniéndose valores muy aproximados a los calculados en el diseño que se muestran en la Tabla 2.2: para L_{P1} se obtuvo un valor real de 1.5865mH, para L_{P2} de 1.5868mH, para L_{P3} de 49.9 μ H y para L_s de 1.5873mH.

3.3.1 Prueba a lazo abierto, modo de operación 1.a: V_{s1} entrega energía a la carga

En este modo de operación la fuente V_{s1} se encarga de entregar energía a la carga. Para verificar la correcta transferencia de energía y el funcionamiento adecuado de la planta se comenzaron las pruebas con un ciclo de trabajo pequeño y con la fuente V_{s1} a 0V, incrementando gradualmente el voltaje de entrada hasta llegar a los 58V, se conectó una carga de 100 Ω a 50W a la salida de la planta. Los resultados obtenidos son mostrados en las ilustraciones 42, 43, 44 y 45:

En la ilustración 42 se muestra el voltaje de entrada V_{s1} cuando la fuente de entrada se encuentra apagada (canal 1), el voltaje de salida V_o (canal 2) y el voltaje V_{DS} del interruptor encargado de la transferencia de energía, S_{w1} (canal 3).

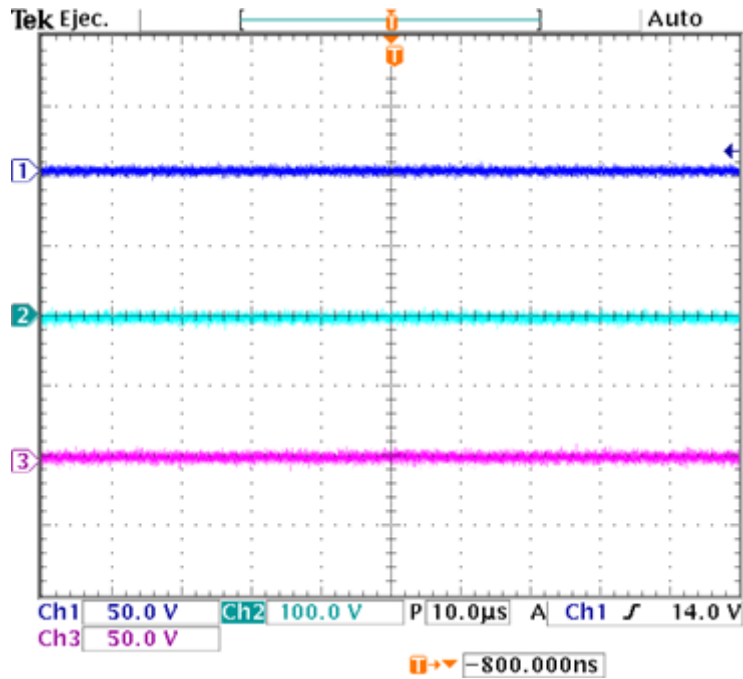


Ilustración 42 - Prueba a lazo abierto, modo de operación 1.a, V_{s1} a 0V. De arriba hacia abajo: Tensión de entrada, tensión de salida, V_{DS} del interruptor que se encuentra conmutando.

En la ilustración 43 se muestra el voltaje de entrada V_{s1} cuando su valor se incrementó hasta los 20V (canal 1), el voltaje de salida V_o (canal 2) y el voltaje V_{DS} del interruptor encargado de la transferencia de energía, S_{w1} (canal 3).

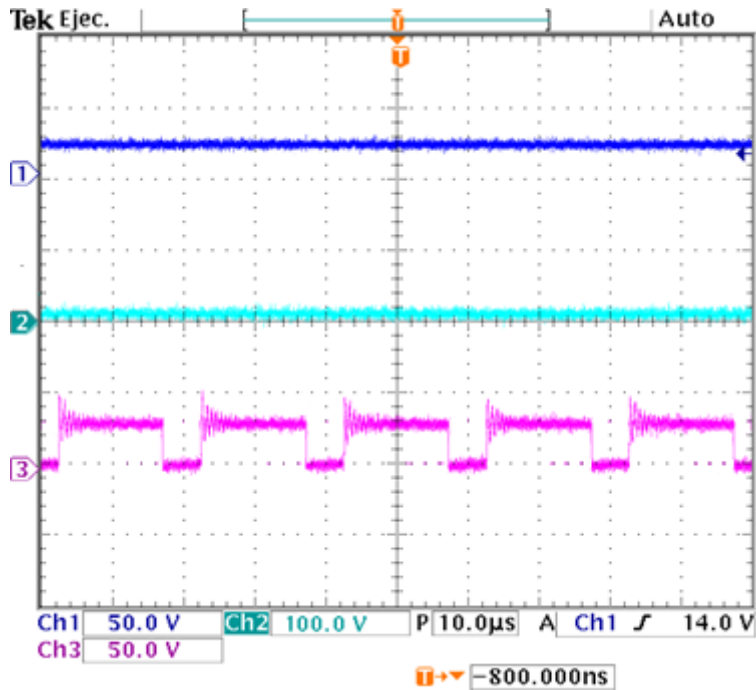


Ilustración 43 - Prueba a lazo abierto, modo de operación 1.a, V_{s1} a 20V. De arriba hacia abajo: Tensión de entrada, tensión de salida, V_{DS} del interruptor que se encuentra conmutando.

En la ilustración 44 se muestra el voltaje de entrada V_{s1} cuando su valor se incrementó hasta los 40V (canal 1), el voltaje de salida V_o (canal 2) y el voltaje V_{DS} del interruptor encargado de la transferencia de energía, Sw1 (canal 3).

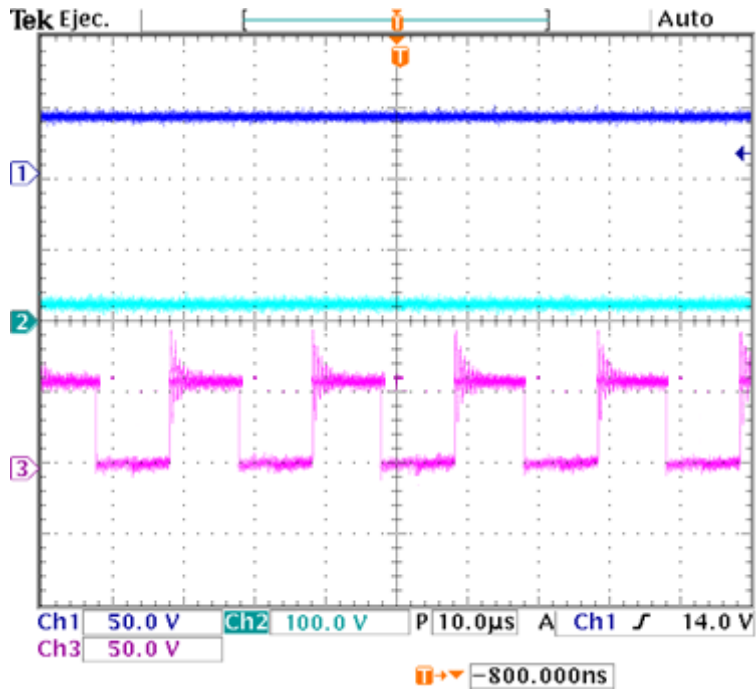


Ilustración 44 - Prueba a lazo abierto, modo de operación 1.a, V_{s1} a 40V. De arriba hacia abajo: Tensión de entrada, tensión de salida, V_{DS} del interruptor que se encuentra conmutando.

En la ilustración 45 se muestra el voltaje de entrada V_{s1} cuando su valor se incrementó hasta los 58V (canal 1), el voltaje de salida V_o (canal 2) y el voltaje V_{DS} del interruptor encargado de la transferencia de energía, S_{w1} (canal 3).

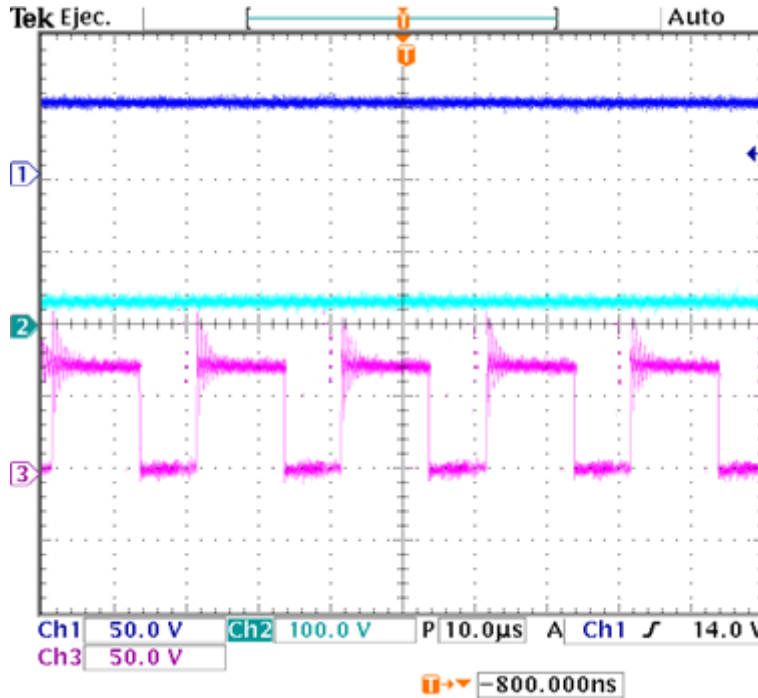


Ilustración 45 - Prueba a lazo abierto, modo de operación 1.a, V_{s1} a 58V. De arriba hacia abajo: Tensión de entrada, tensión de salida, V_{DS} del interruptor que se encuentra conmutando.

Conforme se va aumentando el voltaje de entrada, se aprecia claramente el incremento en el voltaje de salida, entregando un voltaje menor que la entrada ya que el comportamiento deseado de la planta es de un convertidor reductor, tal como se puede apreciar en la Tabla 2.2; se puede comprobar que la transferencia de energía se lleva a cabo sin problemas: El inductor L_{p1} se carga cuando el interruptor S_{w1} se enciende y transfiere la energía almacenada a el inductor L_s cuando el interruptor S_{w1} se apaga; con los resultados obtenidos se verifica también el correcto funcionamiento de la planta propuesta.

3.3.2 Prueba a lazo abierto, modo de operación 2.a: V_{s2} entrega energía a la carga

En este modo de operación la fuente V_{s2} se encarga de entregar energía a la carga. Para verificar la correcta transferencia de energía y el funcionamiento adecuado de la planta se comenzaron las pruebas con un ciclo de trabajo pequeño y con la fuente V_{s2} a 0V, incrementando gradualmente el voltaje de entrada hasta llegar a los 58V, se conectó una

carga de 100Ω a $50W$ a la salida de la planta. Los resultados obtenidos son mostrados en las ilustraciones 46, 47, 48 y 49:

En la ilustración 46 se muestra el voltaje de entrada V_{s2} cuando la fuente de entrada se encuentra apagada (canal 1), el voltaje de salida V_o (canal 2) y el voltaje V_{DS} del interruptor encargado de la transferencia de energía, S_{w2} (canal 3).

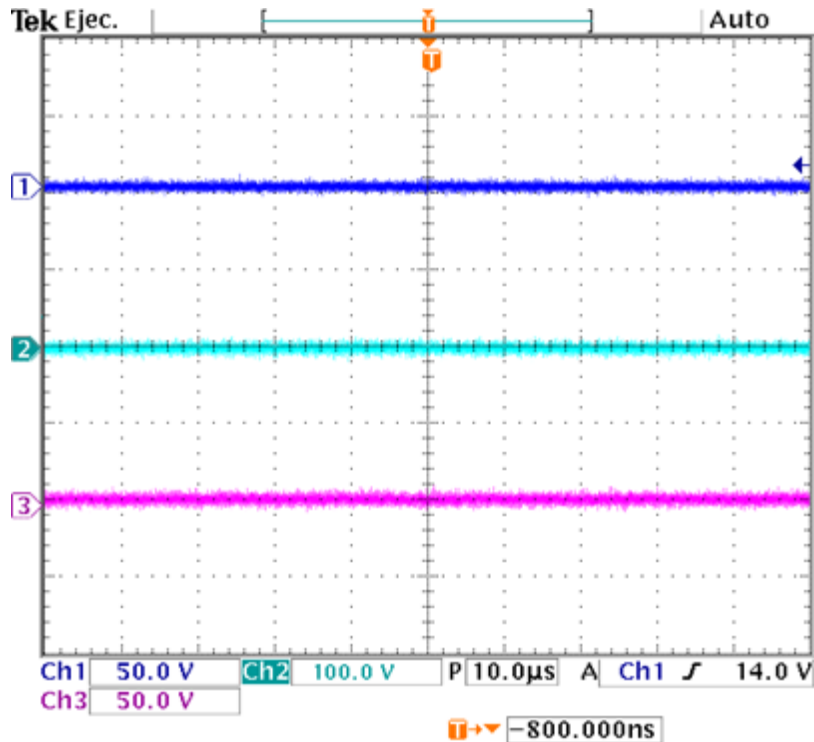


Ilustración 46 - Prueba a lazo abierto, modo de operación 2.a, V_{s2} a $0V$. De arriba hacia abajo: Tensión de entrada, tensión de salida, V_{DS} del interruptor que se encuentra conmutando.

En la ilustración 47 se muestra el voltaje de entrada V_{s2} cuando su valor se incrementó hasta los $20V$ (canal 1), el voltaje de salida V_o (canal 2) y el voltaje V_{DS} del interruptor encargado de la transferencia de energía, S_{w2} (canal 3).

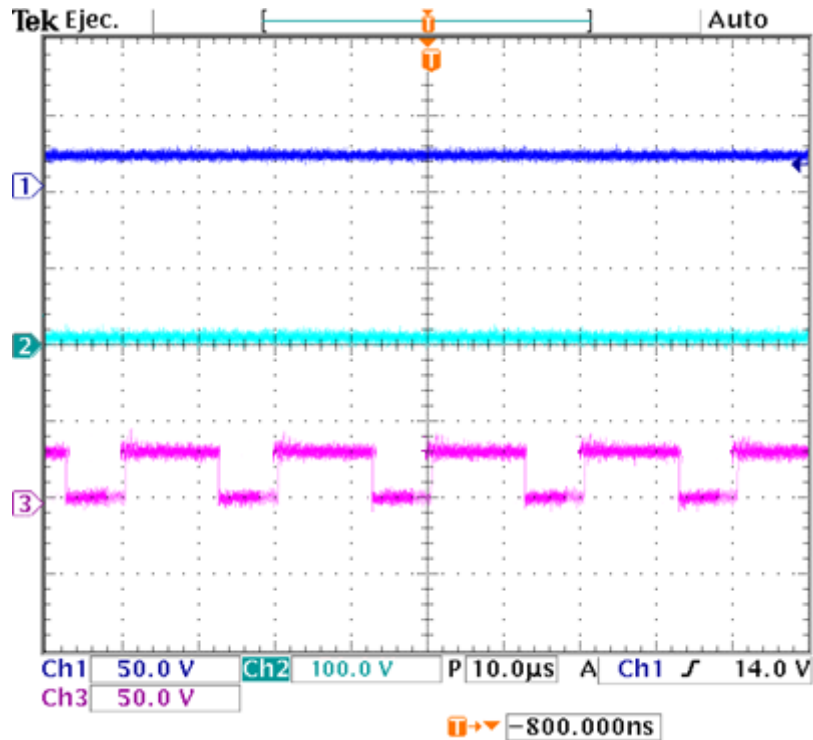


Ilustración 47 - Prueba a lazo abierto, modo de operación 2.a, V_{s2} a 20V. De arriba hacia abajo: Tensión de entrada, tensión de salida, V_{DS} del interruptor que se encuentra conmutando.

En la ilustración 48 se muestra el voltaje de entrada V_{s2} cuando su valor se incrementó hasta los 40V (canal 1), el voltaje de salida V_o (canal 2) y el voltaje V_{DS} del interruptor encargado de la transferencia de energía, S_{w2} (canal 3).

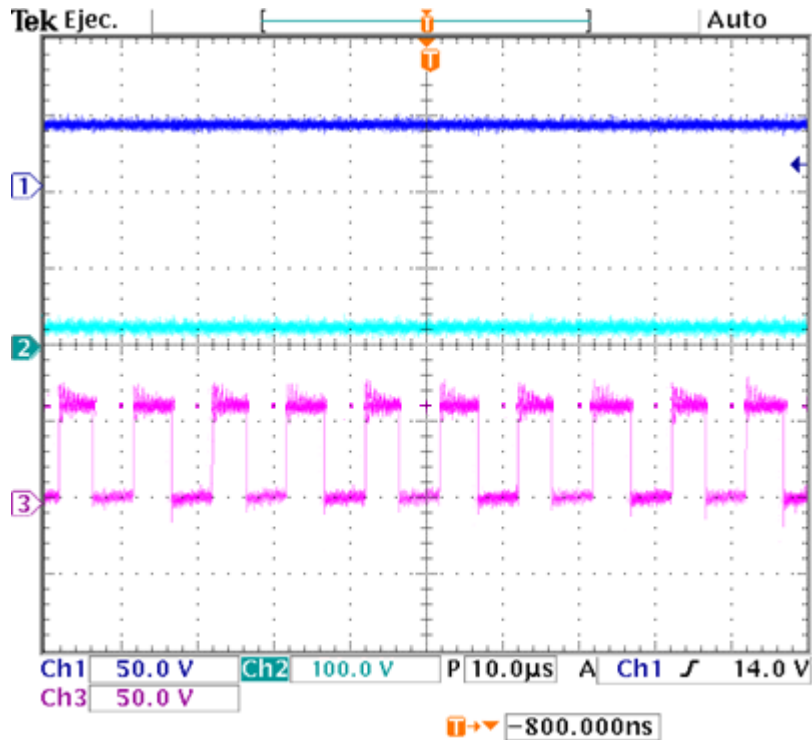


Ilustración 48 - Prueba a lazo abierto, modo de operación 2.a, V_{s2} a 40V. De arriba hacia abajo: Tensión de entrada, tensión de salida, V_{DS} del interruptor que se encuentra conmutando.

En la ilustración 49 se muestra el voltaje de entrada V_{s2} cuando su valor se incrementó hasta los 58V (canal 1), el voltaje de salida V_o (canal 2) y el voltaje V_{DS} del interruptor encargado de la transferencia de energía, S_{w2} (canal 3).

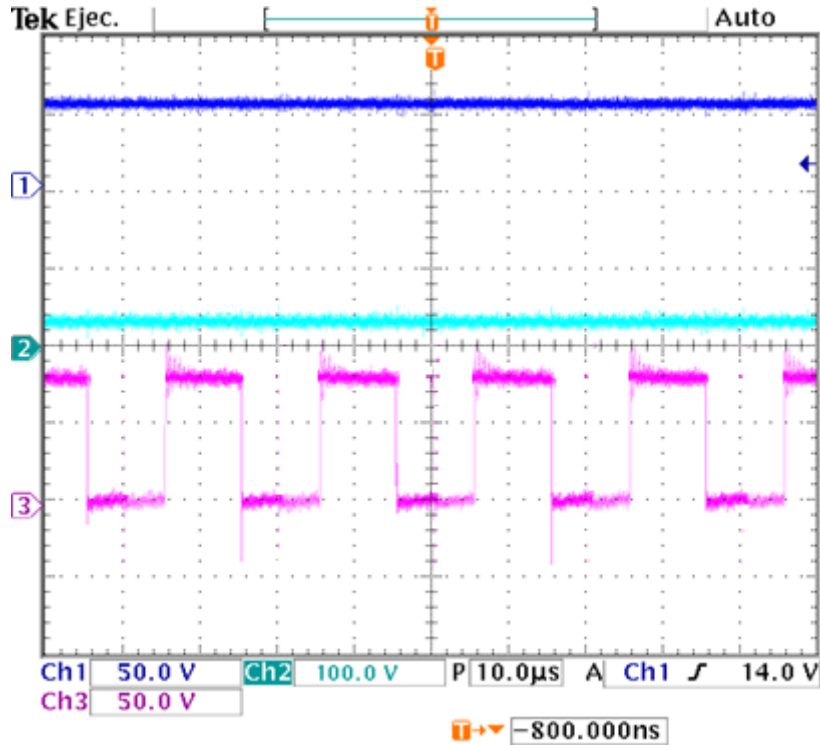


Ilustración 49 - Prueba a lazo abierto, modo de operación 2.a, V_{s2} a 58V. De arriba hacia abajo: Tensión de entrada, tensión de salida, V_{DS} del interruptor que se encuentra conmutando.

Conforme se va aumentando el voltaje de entrada, se aprecia claramente el incremento en el voltaje de salida, entregando un voltaje menor ya que el comportamiento deseado de la planta es de un convertidor reductor, tal como se puede apreciar en la Tabla 2.2; se puede comprobar que la transferencia de energía se lleva a cabo sin problemas: El inductor L_{p2} se carga cuando el interruptor S_{w2} se enciende y transfiere la energía almacenada a el inductor L_s cuando el interruptor S_{w2} se apaga; con los resultados obtenidos se verifica también el correcto funcionamiento de la planta propuesta.

3.3.3 Prueba a lazo abierto, modo de operación 3.a: V_{Bat} entrega energía a la carga

En este modo de operación la fuente V_{Bat} se encarga de entregar energía a la carga. Para verificar la correcta transferencia de energía y el funcionamiento adecuado de la planta se comenzaron las pruebas con un ciclo de trabajo pequeño y con la fuente V_{Bat} a 0V, incrementando gradualmente el voltaje de entrada hasta llegar a los 24V, se conectó una

carga de 100Ω a 50W a la salida de la planta. Los resultados obtenidos son mostrados en las ilustraciones 50, 51 y 52:

En la ilustración 50 se muestra el voltaje de entrada V_{Bat} cuando la fuente de entrada se encuentra apagada (canal 1), el voltaje de salida V_o (canal 2) y el voltaje V_{DS} de los interruptores encargados de la transferencia de energía, S_{w3} - S_{w5} (canal 3).

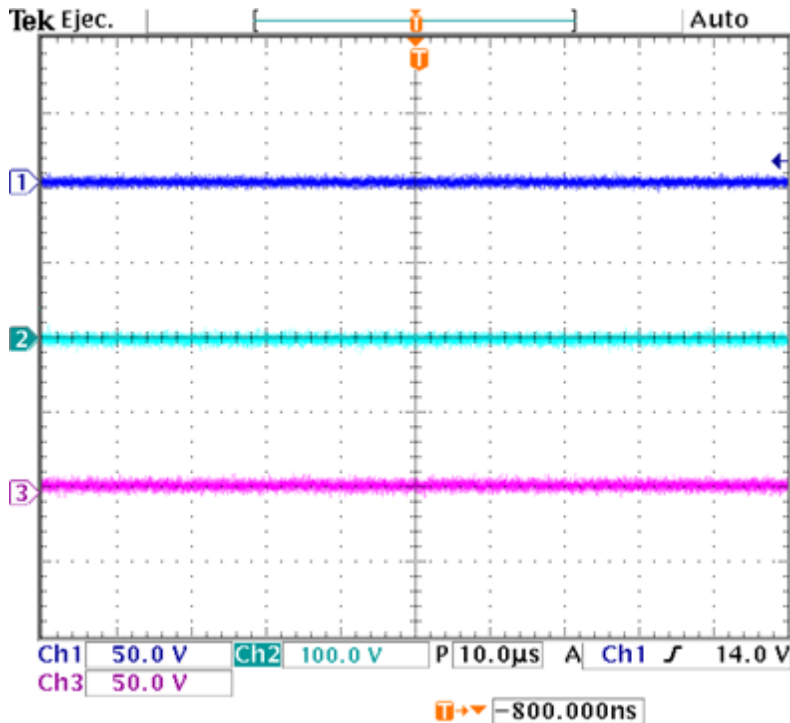


Ilustración 50 - Prueba a lazo abierto, modo de operación 3.a, V_{Bat} a 0V. De arriba hacia abajo: Tensión de entrada, tensión de salida, V_{DS} del interruptor que se encuentra conmutando.

En la ilustración 51 se muestra el voltaje de entrada V_{Bat} cuando su valor se incrementó hasta los 12V (canal 1), el voltaje de salida V_o (canal 2) y el voltaje V_{DS} de los interruptores encargados de la transferencia de energía, S_{w3} - S_{w5} (canal 3).

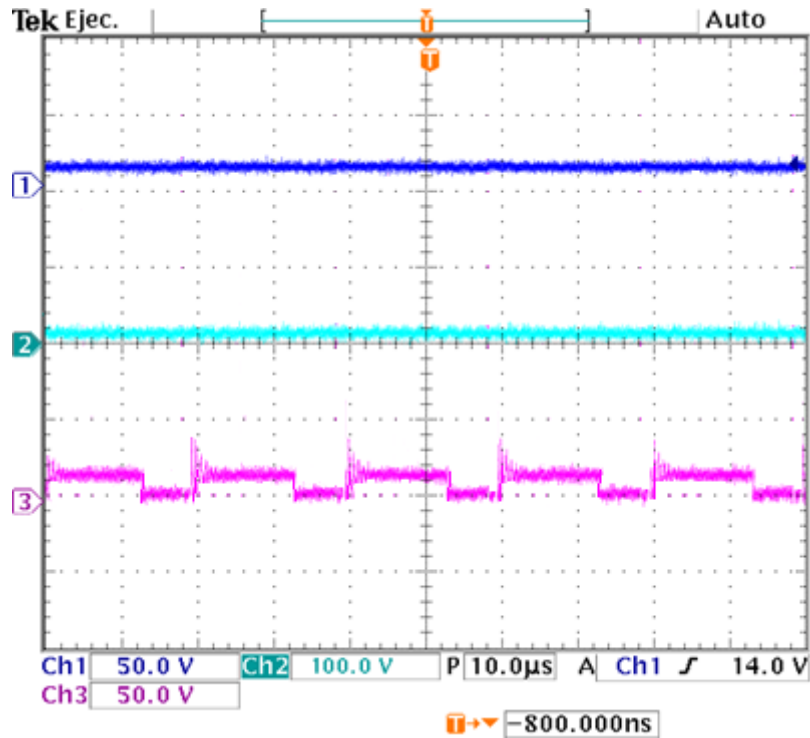


Ilustración 51 - Prueba a lazo abierto, modo de operación 3.a, V_{Bat} a 12V. De arriba hacia abajo: Tensión de entrada, tensión de salida, V_{DS} del interruptor que se encuentra conmutando.

En la ilustración 52 se muestra el voltaje de entrada V_{Bat} cuando su valor se incrementó hasta los 24V (canal 1), el voltaje de salida V_o (canal 2) y el voltaje V_{DS} de los interruptores encargados de la transferencia de energía, S_{w3}- S_{w5} (canal 3).

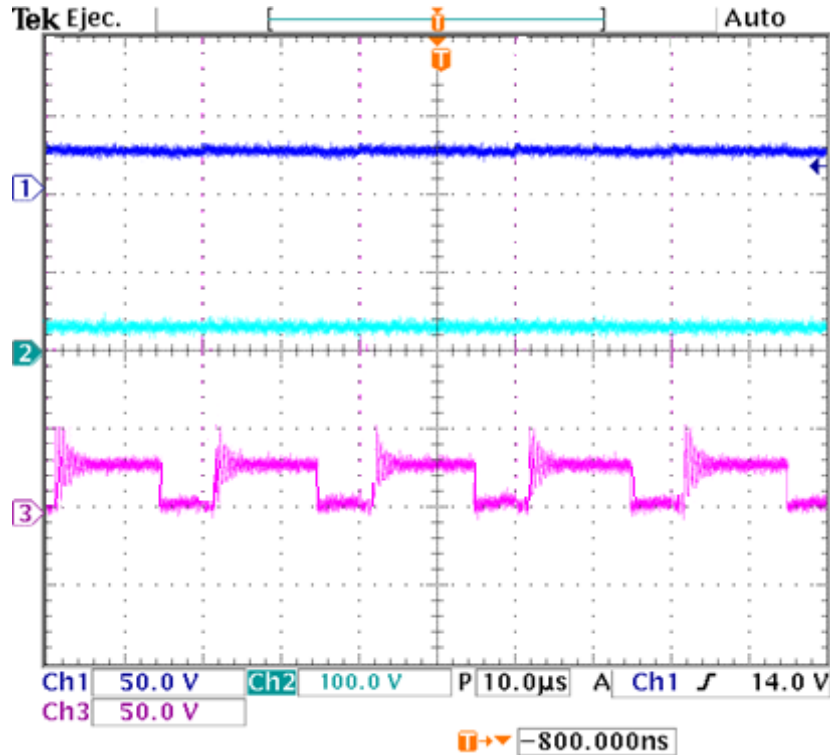


Ilustración 52 - Prueba a lazo abierto, modo de operación 3.a, V_{Bat} a 24V. De arriba hacia abajo: Tensión de entrada, tensión de salida, V_{DS} del interruptor que se encuentra conmutando.

Conforme se va aumentando el voltaje de entrada, se aprecia claramente el incremento en el voltaje de salida, entregando un voltaje mayor, lo cual es el comportamiento deseado de la planta, tal como se puede apreciar en la Tabla 2.2; se puede comprobar que la transferencia de energía se lleva a cabo sin problemas: El inductor L_{p3} se carga cuando los interruptores $S_{w3} - S_{w5}$ se encienden y transfiere la energía almacenada a el inductor L_s cuando los interruptores $S_{w3} - S_{w5}$ se apagan; con los resultados obtenidos se verifica también el correcto funcionamiento de la planta propuesta.

En la ilustración 51 es notable la presencia de ruido en el voltaje VDS de los interruptores $S_{w3} - S_{w5}$ (canal 3), esto se debe al ruido de conmutación derivado del acoplamiento del inductor de la batería (L_{Bat}) con el inductor secundario (L_s). Este ruido no es tan notorio en el canal 3 de las ilustraciones 48 y 44, debido a que el acoplamiento entre L_{p1} y L_s , y entre L_{p2} y L_s es mucho mayor que el acoplamiento entre L_{Bat} y L_s . Lo anterior puede ser solucionado mediante la construcción más precisa de las inductancias acopladas.

iii. CONCLUSIONES

La necesidad de reducir el consumo de combustibles fósiles precisa el diseño y construcción de nuevas maneras de aprovechar de la mejor manera las energías renovables a las que tenemos acceso.

La propuesta en este trabajo de tesis presenta una novedosa topología para el manejo de la energía que recibe para asegurar el constante suministro de energía a la carga gracias a su banco de baterías y a sus dos entradas de voltaje suministrado por paneles solares.

El convertidor presentado es de fácil implementación una vez que se tienen todos los elementos necesarios para calcular las inductancias que se ven involucradas en el sistema; es notable la reducción del tamaño de la placa que fue utilizada para las pruebas a lazo abierto gracias a la buena distribución de los elementos involucrados durante la etapa de diseño.

A pesar que existía la incertidumbre si las inductancias acopladas utilizadas en la implementación de la planta funcionarían correctamente, las pruebas demostraron que el cálculo de éstas fue realizado de manera correcta, proporcionando a la salida de la planta el voltaje planteado en el diseño.

En cada uno de los modos de operación de la topología, la planta tiene el comportamiento de un convertidor Flyback de una sola entrada, simplificando con esto la implementación del control; sin embargo, aunque el control diseñado funciona sin ningún inconveniente en cada modo de operación, no asegura el correcto funcionamiento del sistema cuando se realiza la transición de un modo de operación a otro. El diseño de un control más robusto para la topología propuesta queda como trabajo futuro.

Con respecto a la implementación, dado que la placa diseñada ya cuenta con un sensor de voltaje listo para ser usado, se sugiere como trabajo futuro diseñar el compensador ya sea de manera física o apoyándose de una FPGA y cerrar el lazo.

Es importante resaltar que la carga del banco de baterías está ligada a la potencia de salida que tiene el convertidor, el valor de la corriente a la que se carga no depende de su estado de descarga o a las especificaciones de la batería, sino de la potencia entregada por el sistema, por lo que un posible trabajo futuro es colocar una protección para la máxima corriente de batería.

La topología propuesta fue presentada en el 13°. Congreso Internacional de Electrónica de Potencia 2016 en la ciudad de Guanajuato, México con el siguiente título:

“Multi-Input DC/DC Converter with Battery Backup for Renewable Applications”

iv. REFERENCIAS

- [1] Reglamento de la ley para el aprovechamiento de energías renovables y el financiamiento de la transición energética [En línea]. Disponible en URL: <http://www.cre.gob.mx/documento/1570.pdf>
- [2] Miguel Moro Vallina, “Instalaciones solares fotovoltaicas,” Editorial Paraninfo, 1ª. Edición, Madrid 2010, pp. 12-35.
- [3] Miguel Pareja Aparicio, “Energía solar fotovoltaica: cálculo de una instalación aislada,” Ediciones Técnicas Marcombo, 2ª. edición, Barcelona 2010, pp. 8-11.
- [4] N.Vazquez, C. M. Sánchez, C. Hernández, E. Vázquez, L. del C. García, and J. Arau, “A different three-port DC/DC converter for standalone PV system,” *International Journal of Photoenergy* (Hindawi), 2014.
- [5] N. Vázquez, A. Hernández, C. Hernández, E. Rodríguez, and J. Arau, “Two inputs DC/DC converter applicable in clean-energy resources,” *IEEE International Power Electronics Congress*, no. 1, 2008, pp.185-189.
- [6] N. Vázquez, C. Aguilar, J. Arau, R.O. Cáceres, I. Barbi, and J. Alvarez Gallegos, “A novel uninterruptible power supply system with active power factor correction,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 17, no. 3, May 2002, pp. 405-412.
- [7] S. Chao, B. Miller, K. Mayaram, and T. Fiez, “Multiple-input boost converter for low-power energy,” *IEEE Transactions on Circuits and Systems – II: Express Briefs*, vol. 58, no. 12, December 2011, pp. 827-831.
- [8] N. Vázquez, H. López, C. Hernández, and H. Calleja, “Multiple-output DC-to-DC based on the flyback converter,” *11th IEEE International Power Electronics Congress*, 2008.
- [9] C. Aguilar, F. Canales, J. Arau, J. Sebastián, and J. Uceda, “An integrated battery charger/discharger with power-factor correction,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 44, no. 5, October 1997.
- [10] L. Deshpande, V. Champa, and S. K.Parimala, “Two input positive DC-DC buck-boost converter topology,” *International Journal of Science, Environment and Technology*, vol. 3, no. 2, 2014, pp. 615-620.

- [11] A. Khaligh, “A multiple-input DC-DC positive buck-boost converter topology,” Twenty-Third Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, February 2008, pp. 1522-1526.
- [12] Z. Rehman, I. Al-Bahadly, and S. Mukhopadhyay, “Multi input DC-DC converters in renewable energy applications – An overview,” ELSEVIER, Renewable and Sustainable Energy Reviews 2015, vol. 41, pp. 521-539.
- [13] N. Vazquez, L. Estrada, C. Hernández, and E. Rodriguez, “The tapped-inductor boost converter,” IEEE International Symposium on Industrial Electronics 2007, no. 1, vol. 2007, pp. 538-543.
- [14] Ch. Yaow-Ming, L. Yuan-Chuan and L. Sheng-Hsien, “Double-input PWM DC/DC converter for high/low voltage sources,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 53, no.5, October 2006.
- [15] H. Behjati, A. Davoudi, “A multiple-input multiple-output DC-DC converter,” IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 49, no. 3, May/June 2013.
- [16] Z. Jianwu, Q. Wei, Q. Liyan and J. Yanping, “An isolated multiport DC-DC converter for simultaneous power management of multiple different renewable energy sources,” IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 2, no. 1, March 2014.
- [17] A. I. Pressman, K. Billings and T. Morey, “Switching power supply design,” Editorial McGraw Hill, 3a. Edición, 2009.
- [18] N. D. Benavides and P. L. Chapman, “Power budgeting of a multiple-input buck-boost converter,” IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 20, no. 6, November 2005.
- [19] B. G. Dobbs and P. L. Chapman, “A multiple-input DC-DC converter topology,” IEEE Power Electronics Letters, vol. 1, no. 1, March 2003.
- [20] Ch. Jiabin, G. Youguang and Z. Jianguo, “A general method for designing the transformer of flyback converters based on nonlinear FEA of electromagnetic field couples with external circuit,” Proceeding of international Conference on Electrical Machines and Systems 2007, Oct. 8-11, Seoul, Korea.

- [21] J. Dong-Myoung, K. Min-Kook, K. Dong-Hee W. Dong-Gyun, L. Byoung-Kuk and H. Jin, “Design of a portable emergency power supply with multi input sources,” 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition, Antalya, Turkey, 21-24 Sept 2014.
- [22] W. Rong-Jong and D. Rou-Yong, “High step-up converter with coupled-inductor,” IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 20, no. 5, September 2005.
- [23] Y. Kaiwei, Y. Mao, X. Ming and C. Lee, “Tapped-inductor buck converter for high-step-down DC-DC conversion,” IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 20, no. 4, July 2005.
- [24] A. Khaligh, Young-Joo Lee, “A multiple-input DC-DC converter topology,” IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 24, no. 3, March 2009,
- [25] F. Nejabatkhah, S. Danyali, S. Hossein Hosseini, M. Sabahi and S. Mozaffary Niapour, “Modeling and control of a new three-input DC-DC boost converter for hybrid PV/FC/battery power system,” IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 27, no. 5, May 2012.
- [26] Hernández Sandoval, A., “Convertidor CD-CD de dos entradas aplicable a energías renovables,” Tesis de Maestría, Instituto Tecnológico de Celaya, Gto, 2009.
- [27] Sánchez González, C. M., “Nueva topología de un convertidor CD-CD para sistema autónomo,” Tesis de Maestría, Instituto Tecnológico de Celaya, Gto, 2011.
- [28] Méndez Soriano, I., “Inversor fotovoltaico multifuncional conectado a la red eléctrica,” Tesis de Maestría, Instituto Tecnológico de Celaya, Gto, 2016.
- [29] Karteek G., “Derivation of the new double-input DC-DC converters using the building block methodology,” Master of Science Degree Thesis, Missouri University of Science and Technology, 2008.
- [30] Owen, J., “Multiple input single output (MISO) DC-DC converter for the DC house project,” Senior Project, California Polytechnic University, San Luis Obispo, 2012.
- [31] Solano Rodríguez, V., “Sistema de alimentación con fuente de energía híbrida para aplicaciones de semaforización basado en LEDs de potencia,” Tesis de Maestría, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, 2012.

- [32] H. Rashid, Muhammad, “Electrónica de potencia, circuitos, dispositivos y aplicaciones,” 2ª. Edición, Prentice Hall, 1995.
- [33] Leal Ramírez, A., “Corrección activa del factor de potencia empleando el convertidor flyback”, Tesis de Licenciatura, Universidad Tecnológica de la Mixteca, Acatlima, Huajuapán de León, Oaxaca, 1998.
- [34] S. K. Pandey, S. L. Patil and V. S. Rajguru, “Isolated flyback converter designing, modeling and suitable control strategies,” International Conference on Advances in Power Electronics and Instrumentation Engineering, 2014.
- [35] Simon Ang, Alejandro Oliva, “Power-switching converters”, Taylor & Francis Group, 2005.