

**Control de convertidores DC/DC de tres puertos para sistemas fotovoltaicos aislados.**

**Autores**

**Diana Lorena Cala Quitian, Jefersson Yesid Arguello Castiblanco**

**Trabajo de Grado para optar el título de ingeniero electricista**

**Director**

**María Alejandra Mantilla Villalobos**

**Dra. En Ingeniería**

**Codirector**

**Fausto Osorio Silva**

**Magister en Ingeniería**

**Universidad Industrial de Santander**

**Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas**

**Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones**

**Bucaramanga**

**2020**

### **Dedicatoria**

Este logro se encuentra dedicado a mi familia, quien fue incondicional desde el inicio, me han apoyado en los momentos en que más lo he necesitado y estoy segura que seguirá siendo así, a mi madre por su sacrificio, comprensión y ternura, a mis hermanos por llevar toda una vida cuidando mis pasos.

Que sea la oportunidad de agradecer a todos aquellos que, sin sus consejos, apoyo y compañía no hubiere sido posible avanzar en mi camino a ser profesional y se han convertido en una segunda familia.

A todas gracias, esto es para ustedes.

***Diana Lorena Cala Quitian***

Dedico este logro a Dios y a todas las personas que han formado parte de este camino, a mis padres, por ser mi pilar y principal motivación para seguir este camino; A mis hermanos por siempre estar dispuestos a escucharme y aconsejarme; A mis amigos por acompañarme día a día en cada clase y proyecto, especialmente a Angie, quien con su paciencia, compañía y consejo me motivó cuando mis fuerzas parecían no ser suficientes.

Les dedico este logro a todos los que confiaron en que podía hacerlo aun cuando ni siquiera yo mismo lo hacía.

***Jefersson Yesid Arguello Castiblanco***

**Agradecimientos**

A la Universidad Industrial de Santander, por permitirnos la culminación de esta meta, como miembros de esta importante institución.

A nuestra directora y codirector de trabajo de grado por su acompañamiento y apoyo incondicional en el desarrollo del proyecto y todos sus consejos y recomendaciones.

A cada uno de los docentes, por toda su orientación, todo lo aprendido durante nuestra formación y camino para poder optar por el título de Profesional.

A nuestras familias por su apoyo incondicional y por estar siempre motivándonos.

A nuestros compañeros por estar acompañándonos en el desarrollo y crecimiento.

**Contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	18
1.Componentes de un sistema de generación fotovoltaico aislado.....	19
1.1. Generador fotovoltaico .....	20
1.2. Baterías o almacenamiento .....	20
1.3. Regulador o controlador de carga.....	21
1.4. Inversor de potencia.....	22
1.5. Convertidor dc-dc .....	22
1.5.1.Convertidor convencional elevador.....	23
1.5.2.Convertidor convencional reductor. ....	25
2. Convertidor dc-dc de tres puertos .....	26
2.1. Primera topología de convertidores dc-dc de tres puertos.....	33
2.1.1.Modos 1: Energía entregada por la fuente renovable .....	35
2.1.2.Modos 2: Energía entregada del conjunto de baterías .....	37
2.1.3.Modos 3: no hay energía disponible .....	41
2.2. Segunda topología de convertidores dc-dc de tres puertos.....	43
2.2.1.Modos DO.....	44
2.2.2.Modos DI .....	45
2.2.3.Modos SISO .....	47
3. Modelos y parámetros del sistema.....	48
3.1. Modelos de los paneles fotovoltaicos .....	48
3.2. Parámetros de diseño .....	51

4.Estrategia de control .....	52
4.1. Estrategia de control para la primera topología.....	52
4.1.1. Selector de modos.....	54
4.2. Estrategia de control para la segunda topología .....	55
4.3. Controladores.....	58
4.3.1. Control PI .....	58
4.3.2. Control mppt P&O. ....	64
4.3.3. Control minppt P&O.. ....	65
5. Resultados.....	66
5.1. Indicadores de desempeño.....	96
5.2. Comparación de indicadores de desempeño.....	97
6. Conclusiones.....	98
Referencias bibliográficas.....	100

**Lista de Tablas**

Tabla 1. Comparación de convertidores de tres puertos. ....	32
Tabla 2. Estados de conmutación del primer convertidor. ....	42
Tabla 3. Estados de conmutación del segundo convertidor. ....	48
Tabla 4. Variables de entrada y salida de bloque 'PV Array' .....	49
Tabla 5. Especificaciones de panel solar 5MN6C175-A0 .....	50
Tabla 6. Especificación de diseño .....	52
Tabla 7. Condiciones de funcionamiento del selector de modos .....	55
Tabla 8. Constantes del controlador PI para cada topología. ....	63
Tabla 9. Comparación de indicadores de desempeño .....	97

## Lista de Figuras

Figura 1. Sistema fotovoltaico aislado.....	19
Figura 2. Esquema del convertidor elevador .....	24
Figura 3. Forma de onda de impulsos, tensiones ( $V_O$ , $V_S$ y $V_L$ ) y corriente en el inductor en convertidor elevador. ....	24
Figura 4. Esquema del convertidor reductor.....	26
Figura 5. Forma de onda de impulsos, tensiones ( $V_O$ , $V_S$ y $V_L$ ) y corriente en el inductor en convertidor reductor.....	26
Figura 6. Estructura típica del convertidor de tres puertos. ....	27
Figura 7. Estructura típica del convertidor de tres puertos, (a) no aislado, (b) parcialmente aislado tipo 1, (c) parcialmente aislado tipo 2, (d) aislado.....	29
Figura 8. Convertidores de tres puertos no aislado.....	30
Figura 9. Convertidores de tres puertos parcialmente aislado .....	30
Figura 10. Convertidores de tres puertos aislado.....	31
Figura 11. Esquema convertidor de tres puertos DC-DC (Primera topología).....	33
Figura 12. Subcircuitos cuando la energía se obtiene de la fuente renovable (modo 1.1, sin carga).....	36
Figura 13. Subcircuitos cuando la energía se obtiene de la fuente renovable (modo 1.2, con carga).....	37
Figura 14. Subcircuitos cuando la energía se obtiene de ambas fuentes (modo 2.1, energía disponible de fuentes renovables).....	39

Figura 15. Subcircuitos cuando la energía se suministra desde el conjunto de batería (modo 2.2, solo batería).....	40
Figura 16. Subcircuitos (modo 3.1, batería cargando).....	41
Figura 17. Subcircuitos (modo 3.2, sistema apagado).....	42
Figura 18. Esquema convertidor de tres puertos DC-DC (Segunda topología).....	43
Figura 19. Subcircuitos (modo DO).....	45
Figura 20. Subcircuitos (modo DI).....	46
Figura 21. Subcircuitos (modo SISO).....	47
Figura 22. Bloque 'PV Array' Matlab-Simulink .....	48
Figura 23. Curvas I-V y P-V del arreglo fotovoltaico .....	50
Figura 24. Diagrama de bloques del controlador (Primera topología). .....	53
Figura 25. Selector de modos (Topología 1) .....	54
Figura 26. Diagrama de bloques del controlador (Segunda topología). .....	56
Figura 27. Bloque PWM.....	57
Figura 28. Señal de control de interruptores de la topología 2 .....	57
Figura 29. Esquema convertidor elevador, con interruptor cerrado .....	59
Figura 30. Esquema convertidor elevador, con interruptor abierto .....	59
Figura 31. Control MPPT P&O .....	64
Figura 32. Control MinPPT P&O .....	66
Figura 33. Tensión en el panel en el modo 1.1 (Topología 1).....	67
Figura 34. Pulsos de control ( $S_1$ , $S_2$ , $S_3$ ) y corrientes en los inductores ( $I_{L1}$ , $I_{L2}$ ) para el modo 1.1 (Topología 1) .....	68
Figura 35. Tensión, corriente y potencia de salida para el modo 1.1 (Topología 1) .....	69

Figura 36. Tensión y corriente en el panel en el modo 1.2 (Topología 1).....	70
Figura 37. Estado de carga de la batería en el modo 1.2 (Topología 1) .....	71
Figura 38. Tensión y corriente de la batería en el modo 1.2 (Topología 1).....	71
Figura 39. Pulsos de control ( $S_1, S_2, S_3$ ) y corrientes en los inductores ( $I_{L1}, I_{L2}$ ) para el modo 1.2 (Topología 1) .....	72
Figura 40. Tensión, corriente y potencia de salida para el modo 1.2 (Topología 1) .....	73
Figura 41. Tensión y corriente en el panel en el modo 2.1 (Topología 1).....	74
Figura 42. Estado de carga de la batería en el modo 2.1 (Topología 1) .....	74
Figura 43. Tensión y corriente de la batería en el modo 2.1 (Topología 1).....	75
Figura 44. Pulsos de control ( $S_1, S_2, S_3$ ) y corrientes en los inductores ( $I_{L1}, I_{L2}$ ) para el modo 2.1 (Topología 1) .....	75
Figura 45. Tensión, corriente y potencia de salida para el modo 2.1 (Topología 1) .....	76
Figura 46. Estado de carga de la batería en el modo 2.2 (Topología 1) .....	77
Figura 47. Tensión y corriente de la batería en el modo 2.2 (Topología 1).....	77
Figura 48. Pulsos de control ( $S_1, S_2, S_3$ ) y corrientes en los inductores ( $I_{L1}, I_{L2}$ ) para el modo 2.2 (Topología 1) .....	78
Figura 49. Tensión, corriente y potencia de salida para el modo 2.2 (Topología 1) .....	79
Figura 50. Estado de carga de la batería en el modo 3.1 (Topología 1) .....	80
Figura 51. Tensión y corriente de la batería en el modo 3.1 (Topología 1).....	80
Figura 52. Pulsos de control ( $S_1, S_2, S_3$ ) y corrientes en los inductores ( $I_{L1}, I_{L2}$ ) para el modo 3.1 (Topología 1) .....	81
Figura 53. Puntos de control de conmutación entre modo 2.1 a modo 2.2 (DO a SISO).....	82

Figura 54. Tensión, corriente y potencia de salida en la conmutación entre modo 2.1 a modo 2.2 (DO a SISO).....	83
Figura 55. Tensión y corriente en el panel en la conmutación entre modo 2.1 a modo 2.2 (DO a SISO) .....	84
Figura 56. Tensión en el panel en el modo DO (Topología 2) .....	85
Figura 57. Estado de carga de la batería en el modo DO (Topología 2).....	85
Figura 58. Tensión y corriente de la batería en el modo DO (Topología 2).....	86
Figura 59. Pulsos de control ( $S_1$ , $S_2$ , $S_3$ ) y corriente en el inductor ( $I_L$ ) para el modo DO (Topología 2) .....	86
Figura 60. Tensión, corriente y potencia de salida para el modo DO (Topología 2).....	87
Figura 61. Tensión en el panel en el modo DI (Topología 2).....	87
Figura 62. Estado de carga de la batería en el modo DI (Topología 2). .....	88
Figura 63. Tensión y corriente de la batería en el modo DI (Topología 2) .....	88
Figura 64. Pulsos de control ( $S_1$ , $S_2$ , $S_3$ ) y corriente en el inductor ( $I_L$ ) para el modo DI (Topología 2) .....	89
Figura 65. Tensión, corriente y potencia de salida para el modo DI (Topología 2) .....	90
Figura 66. Estado de carga de la batería en el modo SISO (Topología 2).....	90
Figura 67. Tensión y corriente de la batería en el modo SISO (Topología 2).....	91
Figura 68. Pulsos de control ( $S_1$ , $S_2$ , $S_3$ ) y corriente en el inductor ( $I_L$ ) para el modo SISO (Topología 2) .....	92
Figura 69. Tensión, corriente y potencia de salida para el modo SISO (Topología 2).....	93
Figura 70. Puntos de control de conmutación entre modo DI y el modo SISO.....	94

Figura 71. Tensión, corriente y potencia de salida en la conmutación entre modo DI y el modo SISO .....95

Figura 72. Tensión y corriente en el panel en la conmutación entre modo DI y el modo SISO. ....96

**Lista de Apéndices**

Ver documento adjunto en el CD, pueden ser visualizados en la base de la Biblioteca UIS

Apéndice A. Imágenes de los resultados

Apéndice B. Archivos de Simulación

## Resumen

**Título:** Control de convertidores DC-DC de tres puertos para sistemas fotovoltaicos aislados \*

**Autor:** Diana Lorena Cala Quitian, Jefersson Yesid Arguello Castiblanco \*\*

**Palabras Clave:** MPPT, MinPPT, convertidor DC-DC de tres puertos, instalaciones fotovoltaicas aisladas.

**Descripción:** Los convertidores DC-DC y su estrategia control surgen debido a la necesidad de regular la potencia que fluye de un puerto a otro de la manera más óptima, por ello en el siguiente documento se mostrarán los resultados de la investigación y simulación de dos topologías de convertidores DC-DC de tres puertos. En estas simulaciones se analizó la estrategia de control implementada y la respuesta del convertidor ante diferentes modos de funcionamiento.

Inicialmente se cuenta con diferentes controladores tales como el seguidor del punto de máxima potencia o MPPT por sus siglas en inglés, seguidor del punto de mínima potencia o MinPPT por sus siglas en inglés y controladores proporcional integral (PI), que regulan el seguimiento de diferentes señales de referencia, estos se juntan para conformar dos estrategias de control distintas, una para cada topología, donde la complejidad de éstas depende del control que se quiera implementar, la primera estrategia de control cuenta con seis (6) modos de funcionamiento mientras que la segunda estrategia de control cuenta con solo tres (3) modos de funcionamiento. El conjunto de topologías de convertidores y circuitos de control utilizados permiten realizar una simulación en MATLAB Simulink y así obtener como resultado los datos que arroja el sistema al ser expuesto a diferentes condiciones para así realizar un análisis del comportamiento de estos y de esta forma, establecer las características de funcionamiento de cada uno para posteriormente realizar una comparación.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de ingenierías físico mecánicas. Escuela de ingenierías eléctrica, electrónica y de telecomunicaciones. Directora María Alejandra Mantilla Villalobos. Dr. En ingeniería. Codirector Fausto Osorio Silva. MSc en ingeniería.

### Abstract

**Title:** Three port dc/dc converter control for isolated photovoltaic systems \*

**Authors:** Diana Lorena Cala Quitian, Jefersson Yesid Arguello Castiblanco \*\*

**Key Words:** MPPT, MinPPT, three-port DC-DC converter, isolated photovoltaic systems.

**Description:** The DC-DC converters and their control strategy arise due to the need of regulate and optimize the power flow between their ports. The next document will show the investigation and simulation results of the two topologies of three port DC-DC converters. Based on those simulations an analysis was made to the implemented control strategy and the converter response in different operation modes

Initially there are different controllers like the Maximum Power Tracker (MPPT), Minimum Power Tracker (MinPPT) and proportional and integral action controllers (PI) that regulate the tracking of the reference signals used for the operation of the topology. These controllers are used to make different control strategies for each topology where the complexity of them depends of the implemented control. The first control strategy has six (6) operation modes also the second control strategy have just three (3) operation modes. The set of topologies and control circuits used allows to make a simulation using the software tool called MATLAB Simulink and get as a result the response data from the system when it is exposed to different conditions. Then an analysis of the converter behavior was made in order to set the operating characteristics of each and make a comparison between them.

---

\* Work Degree

\*\* Faculty of Physics Mechanical Engineering. School of Electrical Engineering. Electronics and Telecommunications. Directress: Dr. Eng María Alejandra Mantilla Villalobos. Dr In Engineering. Codirector: Msc. Fausto Osorio Silva. MSc In Engineering

## Introducción

Actualmente, se evidencia un interés creciente por el uso de fuentes alternativas de energías, como lo es la solar fotovoltaica. Una de las causas por las cuales la energía solar fotovoltaica es atractiva es por su característica de ser renovable, lo cual resulta por el uso de una materia prima de la que se extrae la energía sin obtener residuos en el proceso, esta materia prima es la radiación solar; la cual permite que se pueda generar energía eléctrica de manera más limpia y sin la obligación de estar conectado a una red de suministro externa, siendo esto último otra de las ventajas de este método de generación, dando pie a que la energía eléctrica no solo sea un beneficio de las urbanizaciones cercanas a líneas de distribución, facilitando la llegada de esta a zonas aisladas donde por factores geográficos y mayormente económicos no se puede llevar una línea de suministro.

La llegada de la electrónica de potencia fortaleció el avance de esta tecnología, trayendo la posibilidad de controlar el sistema fotovoltaico para aumentar su eficiencia ante diferentes escenarios en los que va a estar expuesto, tanto a diferentes condiciones climáticas como de demanda de energía, haciendo que se adapte de la mejor manera. El control de sistemas fotovoltaicos se ha convertido en una herramienta muy útil (Guacaneme, 2015), por ende, la investigación de estos métodos es más llamativa para los interesados en este tipo de energías renovables.

Uno de los avances traídos por la electrónica de potencia son los convertidores DC-DC de tres puertos, este tipo de convertidores son una alternativa a la solución tradicional de usar dos convertidores DC-DC y permite la integración de una fuente de energía por un puerto de entrada, un sistema de almacenamiento de energía por un puerto bidireccional y un puerto de salida para suministrar energía a una carga con solo un convertidor, trayendo con esto un aumento de la

eficiencia, densidad de energía, disminución del tamaño del mismo (Zhang, Sutanto, & Muttaqi, 2016).

Partiendo de lo anterior, en este trabajo de grado se realizó un análisis del comportamiento de dos topologías DC-DC de tres puertos con sus respectivas estrategias de control, aplicados a sistemas fotovoltaicos aislados con almacenamiento de energía.

### 1. Componentes de un sistema de generación fotovoltaico aislado

Un sistema fotovoltaico aislado, como se muestra en la figura 1, consiste en una disposición de componentes, alguno de ellos son: un arreglo de paneles solares conectados en serie – paralelo, capacitores, baterías que a diferencia de un sistema no aislado son necesarias para los momentos de intermitencia de la radiación solar, convertidores DC-DC, inversores, cableado, entre otros accesorios eléctricos que son necesarios para configurar un sistema de trabajo y el sistema de control (Vargas, L. y Rodríguez, S., 2017, p.20).

A continuación, se describen algunos de los componentes de un sistema fotovoltaico los cuales son de gran relevancia en este trabajo.

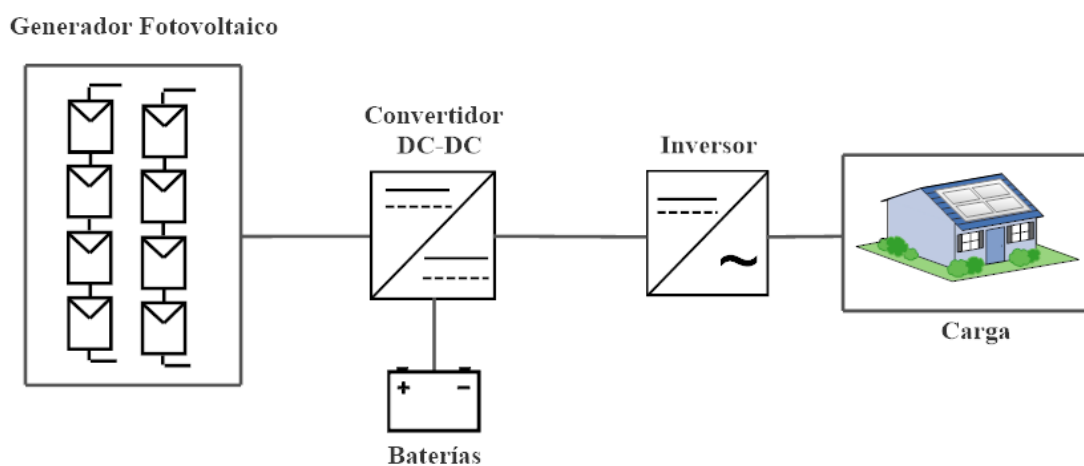


Figura 1. Sistema fotovoltaico aislado

### 1.1. Generador fotovoltaico

Un módulo solar es el “componente encargado de transformar la radiación solar en energía eléctrica a través del efecto fotoeléctrico. Están hechos principalmente por semiconductores (silicio) mono-cristalinos o poli-cristalinos” Sun Supply, (s.f).

Los fabricantes de paneles fotovoltaicos dan los siguientes datos, entre otros:

- Tensión de circuito abierto  $V_{OC}$
- Corriente de cortocircuito  $I_{SC}$
- Corriente en el punto de máxima potencia  $I_{MPP}$
- Tensión en el punto de máxima potencia  $V_{MPP}$
- Potencia máxima  $P_{MPP}$

Estas características se ven afectadas por varios factores como la irradiancia y la temperatura del panel.

### 1.2. Baterías o almacenamiento

El almacenamiento de la energía es un instrumento vital en sistemas aislados para garantizar un suministro de energía a los consumidores de acuerdo a la demanda en el tiempo necesario. Las baterías acumularán la energía cuando esté disponible; y la entregarán en el momento más conveniente, alcanzando un sistema más eficiente con mejores beneficios para los generadores y los consumidores (Santillán Alberto,2016, p.13).

Para seleccionar la batería, se analiza las características técnicas que poseen, como son: profundidad de descarga, ciclos de trabajo, vida útil, madurez de la tecnología, etc. A continuación, se describe las características principales de una batería:

**Rendimiento:** Es la relación entre la energía que se extrae de la batería y la energía que ingresa en la misma. Se debe a las pérdidas en la batería durante la carga y descarga, especialmente por

efectos caloríficos.

Profundidad de descarga: Es el valor en porcentaje de la energía que se puede sacar de un acumulador plenamente cargado en una descarga.

Ciclos de carga/descarga: Es la cantidad de veces que se puede cargar y descargar una batería en su vida útil. Si la descarga es profunda el número de ciclos se reduce, por tanto, su vida útil disminuye.

Un sistema de gestión o manejo de baterías, no solo monitorea y controla los parámetros claves durante su carga y descarga (tensión, corriente, temperatura) para la protección y vigilancia de las baterías; sino que también abarca los procesos para mantener el sistema de almacenamiento listo para suministrar alimentación completa cuando sea necesario, y las técnicas para prolongar su vida útil.

Hay tres objetivos principales en un sistema de gestión de la batería:

- a) Proteger la batería contra daños
- b) Prolongar la vida útil de la batería
- c) Mantener la batería preparada para cumplir con los requisitos funcionales de la demanda (Santillán Alberto, 2016, p.13).

### **1.3. Regulador o controlador de carga**

Los controladores de carga se alimentan de la corriente DC generada por el arreglo fotovoltaico y la usan para cargar una batería o un grupo de baterías. El controlador de carga regula la tensión y la corriente generados por el arreglo fotovoltaico para que pueda cargar adecuadamente la batería o el banco de baterías. La potencia generada por los paneles solares varía con la exposición a la radiación solar (fotones). Si no hubiera un controlador de carga en el sistema fotovoltaico, las baterías podrían sobrecargarse y dañarse (Energía solar, (s.f)).

#### **1.4. Inversor de potencia**

La función de un inversor es cambiar una señal de entrada de corriente continua a una señal en corriente alterna, con la magnitud y frecuencia deseada. Este a su vez, dispone de funciones de protección, para garantizar tanto la calidad de la energía entregada a la red como la seguridad propia de la instalación y las personas.

En los inversores ideales, las formas de onda de tensión de salida deberían ser sinusoidales. Sin embargo, los reales contienen ciertos armónicos (Vargas, L. y Rodríguez, S., 2017, p.24).

#### **1.5. Convertidor DC-DC**

En muchas aplicaciones industriales, es necesario regular una tensión continua ya sea procedente de baterías o de alguna fuente de alimentación en DC, para obtener en la salida una tensión menor, igual o mayor a la de entrada. Un convertidor DC, convierte directamente una señal de DC a otra DC. Este convertidor se puede considerar como el equivalente de un transformador de corriente alterna, con una relación de vueltas que varía en forma continua y al igual que este se puede utilizar como una fuente de DC reductora o elevadora de tensión.

Los convertidores DC-DC se utilizan ampliamente en el control de los motores de tracción de automóviles eléctricos, tranvías eléctricos, grúas marinas, montacargas y elevadores de minas.

En sistemas fotovoltaicos, el convertidor DC-DC reduce o eleva la tensión del generador fotovoltaico y adecua la señal de tensión de entrada para los inversores. Muchas veces mediante diversas estrategias de control permiten modificar la carga vista por el panel, llevando a este a trabajar en un punto de operación dado, como por ejemplo en el punto de máxima potencia o MPP por sus siglas en inglés (Vargas, L. y Rodríguez, S., 2017, p.27).

A continuación, se describen algunas topologías de convertidores, los cuales son de importancia para la posterior descripción del convertidor a trabajar en este trabajo de grado.

**1.5.1. Convertidor convencional elevador.** El convertidor elevador (boost converter) (ver figura.2) se caracteriza porque su tensión de salida es mayor o igual que la tensión de entrada.

El funcionamiento de este convertidor se puede dividir en dos estados. El estado 1 empieza cuando el interruptor se cierra, en un instante de tiempo cero ( $t=0$ ); la corriente de entrada pasa por el inductor y el interruptor. El estado 2 se inicia cuando el interruptor se apaga y la corriente que antes pasaba por el interruptor, ahora pasa por el inductor, el capacitor, el diodo y la carga. Cuando la corriente del inductor baja, se enciende nuevamente el interruptor dando inicio nuevamente el ciclo (Cardona, S. y Ospina, S., 2015, p.13).

Para modo de operación continuo, las ecuaciones del sistema son:

$$V_O = \frac{V_i}{1-D} \quad \text{Ecuación 1.1}$$

$$L = \frac{V_i D T_s}{\Delta I_L} \quad \text{Ecuación 1.2}$$

$$C = \frac{V_O D T_s}{R \Delta V_O} \quad \text{Ecuación 1.3}$$

Donde cada variable corresponde a:

$V_i$ : Tensión de entrada

$V_O$ : Tensión de salida;  $R$ : Resistencia

$V_C$ : Tensión en el capacitor;  $i_C$ : Corriente en el capacitor;  $C$ : Capacitor

$i_d$ : Corriente en el diodo;  $D_d$ : Diodo

$V_L$ : Tensión en el inductor;  $i_L$ : Corriente en el inductor;  $L$ : Inductor

$\Delta I_L$ : Rizo de la corriente  $i_L$ ;  $\Delta V_O$ : Rizo de la tensión  $V_O$

$T_s$ : Periodo de conmutación del interruptor

D: Ciclo de trabajo del interruptor o relación entre el tiempo de encendido del interruptor y el periodo de conmutación.

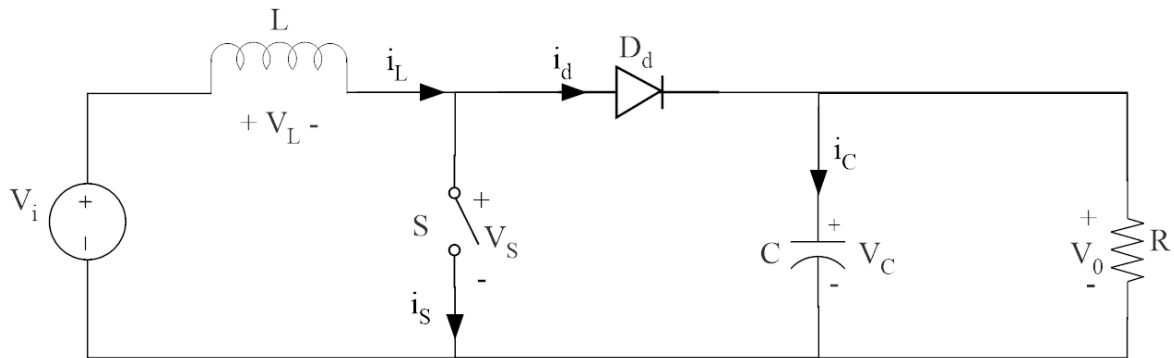


Figura 2. Esquema del convertidor elevador

En la figura 3 se muestra las formas de onda típicas de corrientes y voltajes de un convertidor elevador operando en modo continuo.

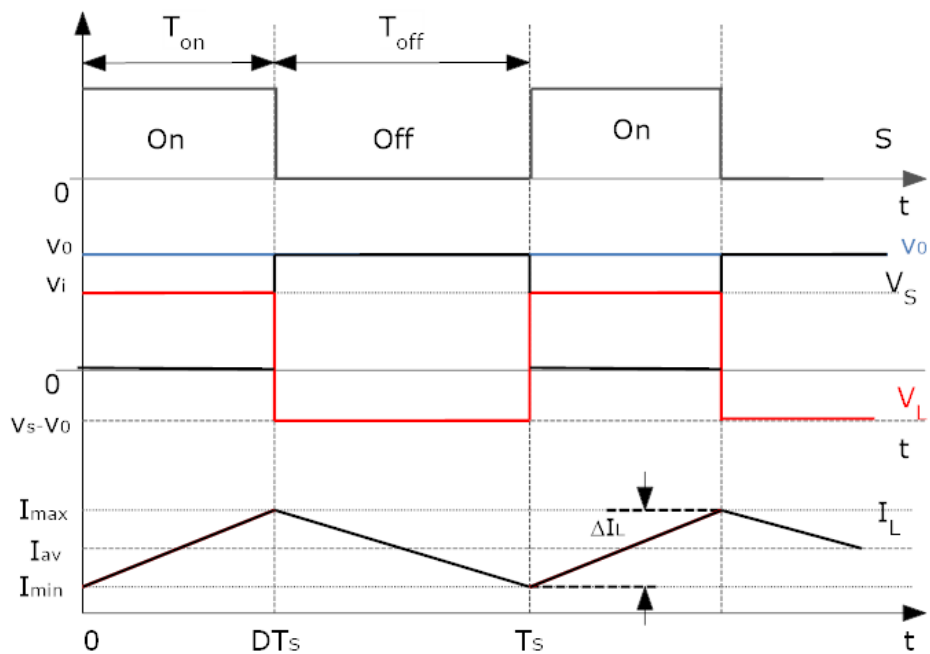


Figura 3. Forma de onda de impulsos, tensiones ( $V_0$ ,  $V_S$  y  $V_L$ ) y corriente en el inductor en convertidor elevador.

**1.5.2. Convertidor convencional reductor.** El convertidor reductor (*buck converter*) (ver figura.4) se caracteriza porque su tensión de salida es menor o igual a la tensión de entrada.

El funcionamiento de este convertidor se puede dividir en dos estados, El estado 1 comienza cuando el interruptor se cierra. La corriente de entrada pasa por el inductor, el capacitor y la resistencia. El estado 2 comienza cuando se apaga el interruptor. El diodo conduce la energía en el inductor y la corriente del inductor sigue pasando por el capacitor, la carga y el diodo, así continuamente (Cardona, S. y Ospina, S., 2015, p.12).

En modo de operación continuo, las ecuaciones principales del convertidor reductor son:

$$V_o = D V_i \quad \text{Ecuación 1.4}$$

$$L = \frac{(V_i - V_o) D T_s}{\Delta I_L} \quad \text{Ecuación 1.5}$$

$$C = \frac{(V_i - V_o) D T_s^2}{8 L \Delta V_o} \quad \text{Ecuación 1.6}$$

Donde cada variable corresponde a:

$V_o$ : Tensión de salida; R: Resistencia

$V_i$ : Tensión de entrada

$V_C$ : Tensión en el capacitor;  $i_C$ : Corriente en el capacitor; C: Capacitor

$V_d$ : Tensión en el diodo;  $D_d$ : Diodo

$V_L$ : Tensión en el inductor;  $i_L$ : Corriente en el inductor; L: Inductor

$\Delta I_L$ : Rizo de la corriente  $i_L$ ;  $\Delta V_o$ : Rizo de la tensión  $V_o$

D: Ciclo de trabajo del interruptor

$T_s$ : Periodo de conmutación del interruptor

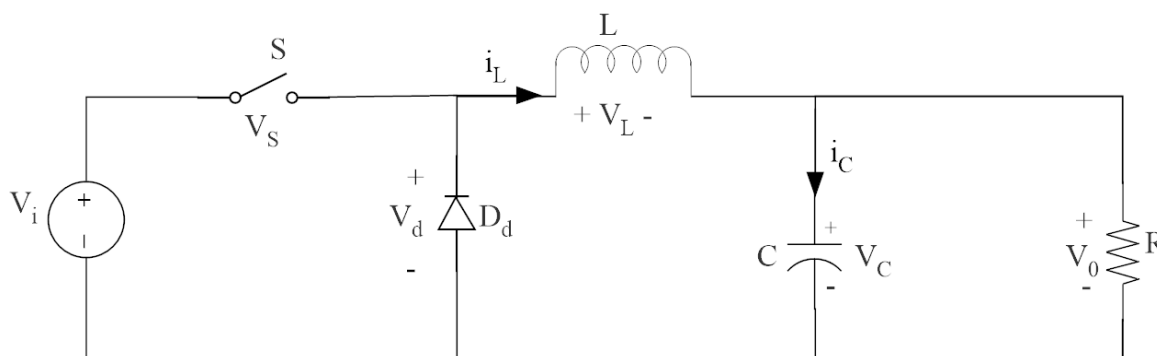


Figura 4. Esquema del convertidor reductor

En la figura 5, se muestra las formas de onda típicas de corrientes y voltajes de un convertidor reductor operando en modo continuo.

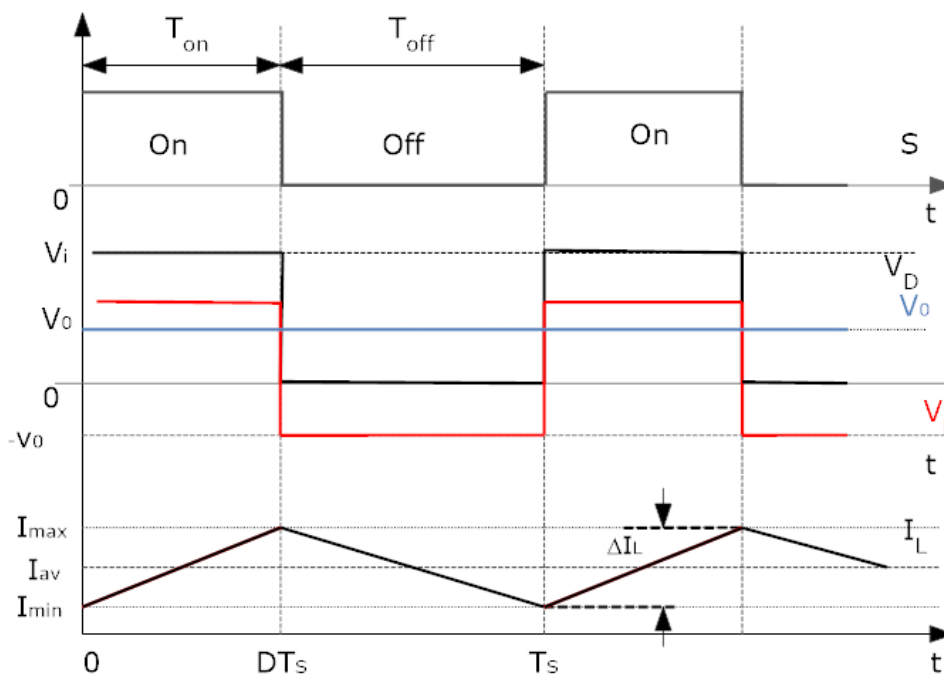
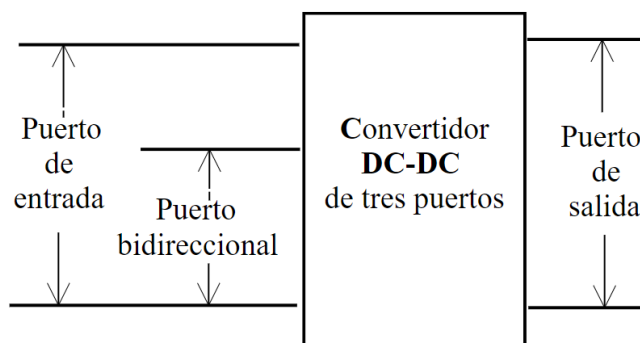


Figura 5. Forma de onda de impulsos, tensiones ( $V_0$ ,  $V_S$  y  $V_L$ ) y corriente en el inductor en convertidor reductor.

## 2. Convertidor DC-DC de tres puertos

Los convertidores DC-DC de tres puertos son dispositivos que generalmente incluyen un puerto de entrada de DC para una fuente de energía comúnmente renovable, un puerto de entrada de DC

bidireccional para un sistema de almacenamiento de energía, y un puerto de salida DC para suministrar energía a la carga, tal como se observa en la figura 6. Este convertidor es una solución preferible al método tradicional que utiliza dos convertidores DC-DC: uno para las fuentes renovables y otro para el sistema de almacenamiento de energía. En los últimos años, muchos convertidores DC-DC de tres puertos se han propuesto e incorporado en la literatura, cada uno de estos convertidores tiene su propia topología y principio operativo, lo que resulta en diferentes complejidades, diferentes números de componentes, diferente confiabilidad y eficiencia. En esta sección se presentará una comparación de las características de diferentes topologías de convertidores DC-DC de tres puertos que han sido propuestas por diferentes grupos de investigación y se revisan brevemente. Estos convertidores se pueden clasificar en 3 tipos: no aislados, parcialmente aislados y aislados (N. Zhang, D. Sutanto & K. M. Muttaqi, 2016, p. 4).



*Figura 6.* Estructura típica del convertidor de tres puertos.

Los convertidores de tres puertos no aislados pueden dar como resultado un número de componentes reducidos y una estructura compacta, además se caracterizan porque sus tres puertos están conectados directamente. Una desventaja de estos convertidores es la limitada ganancia de tensión.

En comparación con los convertidores de tres puertos no aislados, los convertidores de tres puertos parcialmente aislados, que utilizan un transformador para aislar un puerto de los otros dos puertos con conexión a tierra común, es que pueden obtener una mayor ganancia de tensión que la obtenida con la relación de vueltas del transformador. Sin embargo, el sistema de almacenamiento de energía en estos convertidores continúa funcionando en todos los modos operativos, lo que puede acortar la vida útil del sistema de energía y disminuir la confiabilidad del sistema.

Similar a los convertidores parcialmente aislados, los convertidores aislados se basan en el uso de un transformador de alta frecuencia, que puede ayudar a equilibrar los diferentes niveles de tensión entre los diferentes puertos. Sin embargo, el número de los componentes utilizados en este tipo de convertidor son muy grandes, ya que los componentes rara vez se comparten. Aunque los convertidores parcialmente aislados y aislados se pueden operar con conmutación suave en los interruptores usando el control apropiado y los métodos de modulación, todavía puede ocurrir una alta pérdida de potencia debido a la inductancia de fuga del transformador. También, el uso de un transformador puede hacer que el convertidor sea voluminoso y reducir la densidad de potencia general.

Esta sección proporciona una breve revisión de los convertidores DC-DC de tres puertos propuestos por diferentes grupos de investigación en recientes años y compara sus características en términos de la cantidad de componentes y eficiencias reportadas.

Se muestran en la figura 7. (a) la configuración típica de los convertidores DC-DC de tres puertos no aislados, lo que muestra que los tres puertos del convertidor se conectan directamente sin ningún aislamiento galvánico, lo que puede dar como resultado un tamaño pequeño y una alta densidad de potencia.

La figura 7. (b) y la figura 7. (c) muestran las topologías de dos métodos de conexión de los convertidores parcialmente aislados y la figura 7. (d) muestra la configuración de los convertidores DC-DC de tres puertos aislados. Tanto los convertidores parcialmente aislados como los aislados utilizan un transformador de alta frecuencia para implementar el aislamiento entre diferentes puertos para evitar riesgos de descarga. Estos tres tipos de convertidores pueden implementarse para satisfacer los requisitos de aplicaciones industriales (N. Zhang, D. Sutanto & K. M. Muttaqi, 2016, p. 6).

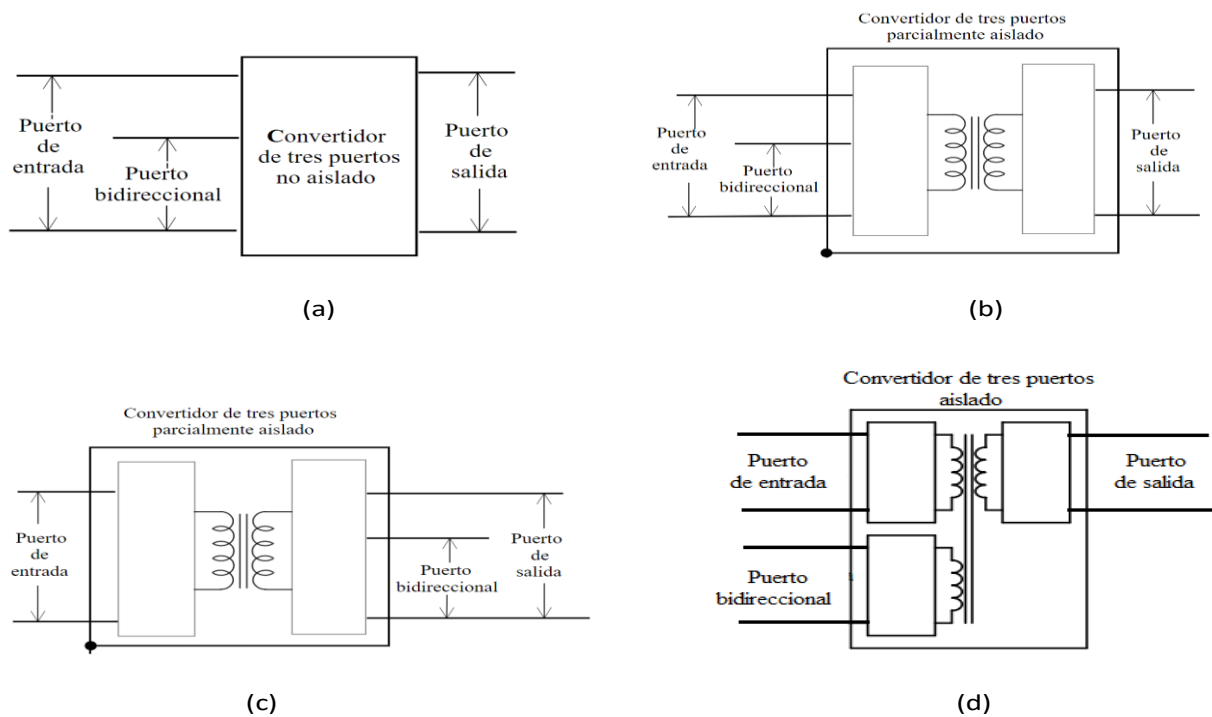


Figura 7. Estructura típica del convertidor de tres puertos, (a) no aislado, (b) parcialmente aislado tipo 1, (c) parcialmente aislado tipo 2, (d) aislado.

A continuación, se muestra un ejemplo de convertidores no aislados, parcialmente aislados y aislado:

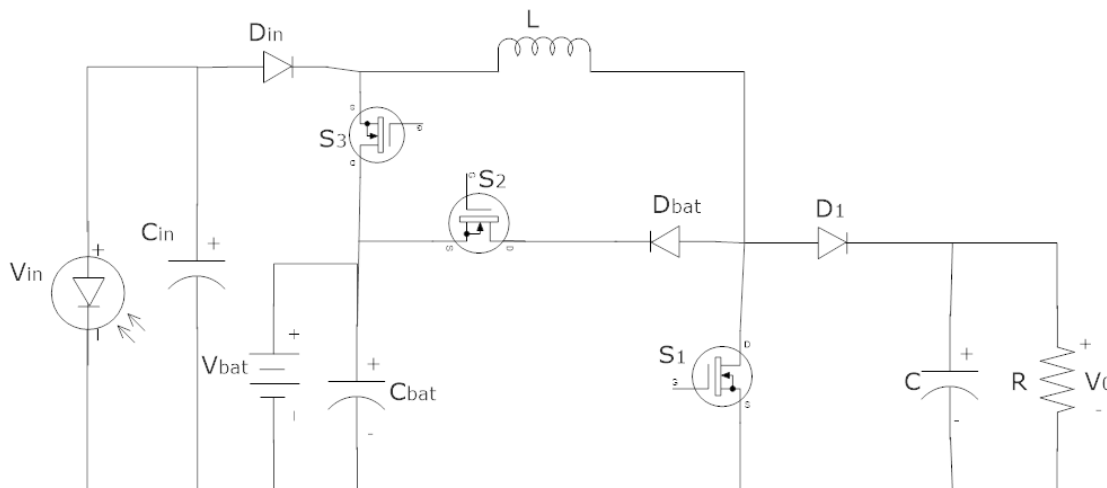


Figura 8. Convertidores de tres puertos no aislados. Adaptado de A review of topologies of three-port DC-DC converters for the integration of renewable energy and energy storage system.

Renewable and Sustainable Energy Reviews. Recuperado de:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032115013465>

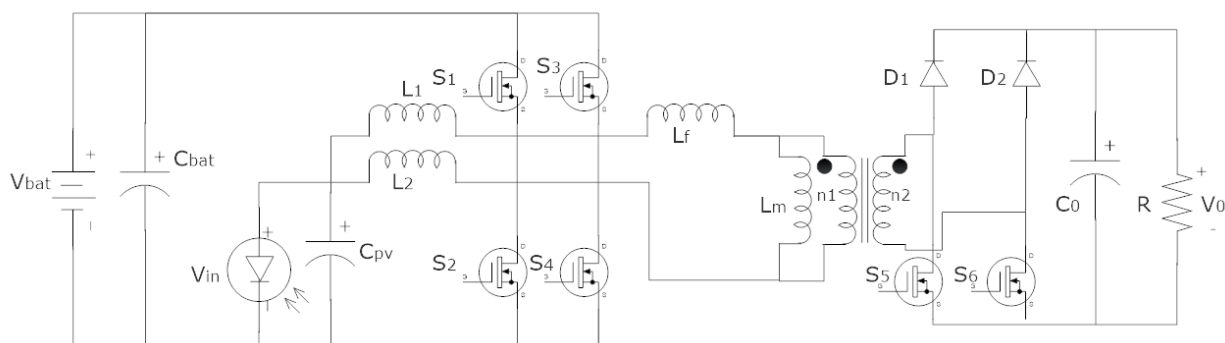


Figura 9. Convertidores de tres puertos parcialmente aislados. Adaptado de A review of topologies of three-port DC-DC converters for the integration of renewable energy and energy storage system. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Recuperado de:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032115013465>

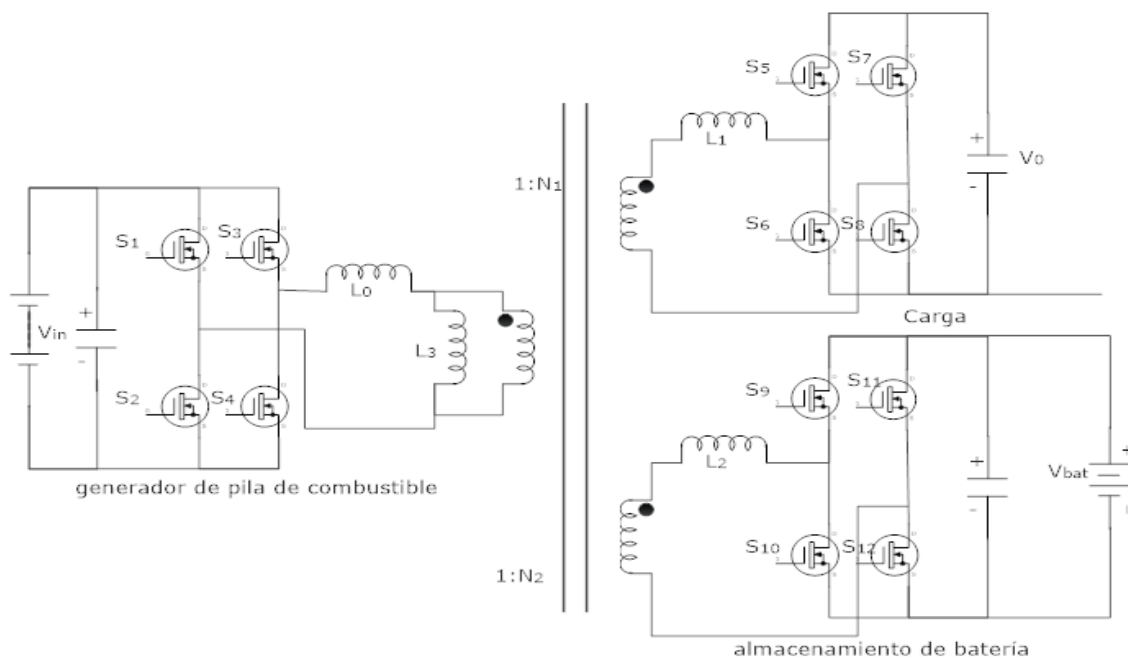


Figura 10. Convertidores de tres puertos aislados. Adaptado de A review of topologies of three-port DC-DC converters for the integration of renewable energy and energy storage system.

Renewable and Sustainable Energy Reviews. Recuperado de:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032115013465>

El objetivo principal de los convertidores DC-DC de tres puertos es abordar la naturaleza intermitente de las fuentes renovables aprovechando los sistemas de almacenamiento de energía, usando solo un convertidor DC-DC con dos puertos de entrada y uno de salida. Existen diferentes ventajas y desventajas, una comparación en términos de número de componentes, capacidad y eficiencia de estos convertidores se proporciona en la Tabla 1. Además del costo de los circuitos de control, los convertidores de tres puertos no aislados generalmente pueden resultar en un menor costo que los convertidores parcialmente aislados y aislados, ya que generalmente usan menos componentes. Además, la necesidad de usar un transformador de alta frecuencia puede aumentar aún más su costo (N. Zhang, D. Sutanto & K. M. Muttaqi, 2016, p. 6).

La confiabilidad es un factor crucial para evaluar el rendimiento de los convertidores, la confiabilidad disminuirá con el paso del tiempo de operación. Con respecto a la ocurrencia de fallas eléctricas externas, los convertidores aislados presentan un mejor comportamiento. Sin embargo, en cuanto a fallas propias del convertidor, los convertidores no aislados y parcialmente aislados tienen confiabilidad relativamente más alta comparada con los convertidores aislados.

Los convertidores no aislados son ampliamente utilizados en aplicaciones de pequeña potencia, como por ejemplo productos portátiles, pero no aplicable cuando se requiere aislamiento galvánico estricto, donde los convertidores de tres puertos parcialmente aislados y aislados son mejores opciones (N. Zhang, D. Sutanto & K. M. Muttaqi, 2016, p. 6).

Tabla 1.  
Comparación de convertidores de tres puertos.

Estructura de convertidor	Número de semi-conductores	Número de inductores	Número de bobinados del transformador	Capacidad reportada	Eficiencia máxima reportada	Características
<b>No aislado</b>	3 interruptores, 3 diodos	1	No disponible	1kW	97,20%	Tamaño pequeño, alta integración, alta eficiencia, alta densidad de potencia.
<b>Parcialmente aislado</b>	6 interruptores, 2 diodos	2, 1 transformador	2	800W	92%	ZVS ( <i>Zero Voltage Switching</i> ) para todos los interruptores; alta densidad de potencia; alta eficiencia.
<b>Aislado</b>	12 interruptores	1 transformador	3	1,5 kW	91,70%	Relaciones de conversión de alto tensión. Aislamiento galvánico para los tres puertos.

*Nota:* Adaptado de A review of topologies of three-port DC-DC converters for the integration of renewable energy and energy storage system. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032115013465>

Muchos convertidores DC-DC de tres puertos no aislados se han presentado en la literatura con diferentes controles y métodos de modulación, algunos de ellos usan solo un inductor, lo que resulta en un tamaño pequeño y una mejora de densidad de potencia mientras que otros usan dos o tres inductores. Como la mayoría de estos convertidores se derivan de los convertidores tradicionales, como el *buck* y o el *buck-boost*, la ganancia de estos convertidores es limitada para superar esta limitación. En este trabajo de grado se revisaron 2 topologías de convertidores DC-DC de tres puertos no aislados, cuyas características y principio de operación se presenta a continuación.

### 2.1. Primera topología de convertidores DC-DC de tres puertos

La propuesta de convertidor de tres puertos, que se muestra en la Figura 11 (Vázquez *et al*, 2014, p. 2), es adecuada para aplicaciones de energías renovables, especialmente para sistemas aislados, donde un conjunto de baterías y administración de flujo de energía son necesarios. Esta última característica se puede llevar a cabo fácilmente por este convertidor.

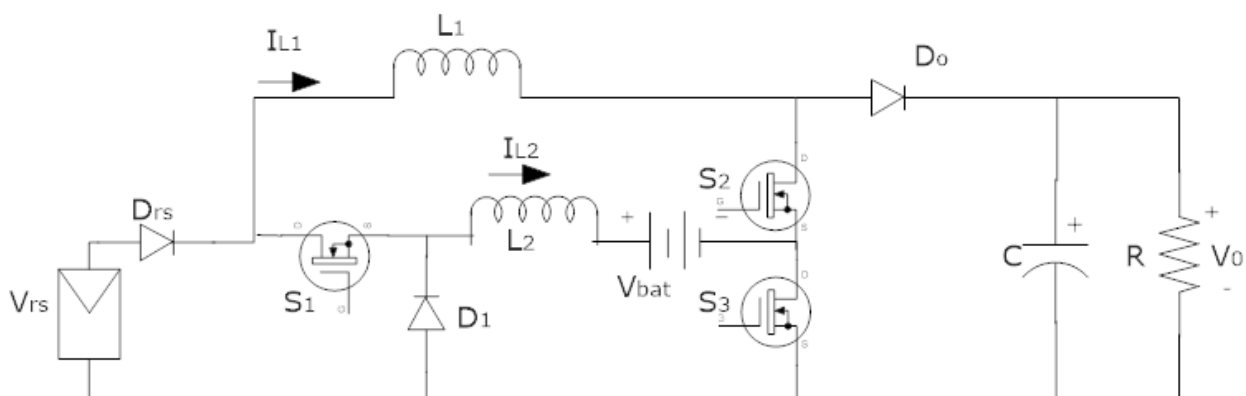


Figura 11. Esquema convertidor de tres puertos DC-DC (Primera topología). Adaptado de A Different Three-Port DC/DC Converter for Standalone PV System (2014). International Journal of Photoenergy. Recuperado de: <https://new.hindawi.com/journals/ijp/2014/692934/>

El sistema está compuesto por tres interruptores ( $S_1$ ,  $S_2$  y  $S_3$ ), tres diodos ( $D_1$ ,  $D_{rs}$  y  $D_o$ ), dos inductores ( $L_1$  y  $L_2$ ) y un capacitor ( $C$ ), como se muestra en la Figura 9. Cada uno de los interruptores determina el funcionamiento del sistema; esto permite una fácil y buena administración de energía.

Para sistemas independientes, la energía se proporciona principalmente por una fuente renovable, que depende de las condiciones climáticas, luego se considera el conjunto de baterías para garantizar el suministro de energía dado que el consumo de energía está restringido a un límite máximo, esto tiene que ser optimizado (Vázquez *et al*, 2014, p. 3).

Cuando se considera un sistema fotovoltaico aislado y una carga conectada, existen diferentes posibilidades; estos escenarios deben ser tomados en cuenta en el convertidor de potencia para regular la tensión de salida sin importar las condiciones climáticas.

En cada escenario se considerarán diferentes etapas dependiendo de las funciones requeridas; a continuación, se describen los modos de funcionamiento del sistema. Para la descripción de estos modos, se definieron las siguientes variables:  $V_{rs}$  es la tensión de la fuente renovable,  $V_{bat}$  es la tensión en la batería,  $V_0$  es la tensión de salida,  $I_{L1}$  es la corriente en la inductancia  $L_1$ ,  $I_{L2}$  es la corriente en la inductancia  $L_2$ ,  $C$  es el capacitor,  $L_1$  y  $L_2$  son las inductancias,  $d_{s1}$  es el ciclo de trabajo del interruptor  $S_1$ ,  $d_{s2}$  es el ciclo de trabajo del interruptor de  $S_2$  y  $d_{s3}$  es el ciclo de trabajo del interruptor de  $S_3$ .

**2.1.1. Modo 1: Energía entregada por la fuente renovable.** En este modo de funcionamiento el generador fotovoltaico es el encargado de entregar la potencia total que requiere la carga, mientras que la batería puede estar totalmente cargada (modo 1.1) o es cargada mediante el generador fotovoltaico (modo 1.2). A continuación, se explican estos dos sub-modos.

#### Modo 1.1

En el modo 1.1 el interruptor  $S_3$  permanece encendido mientras que  $S_1$  permanece apagado y  $S_2$  está conmutando, se puede visualizar en la figura 12 este fenómeno donde se observa que la fuente renovable  $V_{rs}$  es la única encargada de alimenta a la carga. Las ecuaciones resultantes en este modo son las siguientes:

$$\frac{di_{L1}}{dt} = \frac{V_{rs}}{L_1} - \frac{V_o}{L_1} (1 - ds_2) \quad \text{Ecuación 2.1}$$

$$\frac{dV_o}{dt} = \frac{i_{L1}}{C} (1 - ds_2) - \frac{V_o}{RC} \quad \text{Ecuación 2.2}$$

$$V_o = \frac{V_{rs}}{(1 - ds_2)} \quad \text{Ecuación 2.3}$$

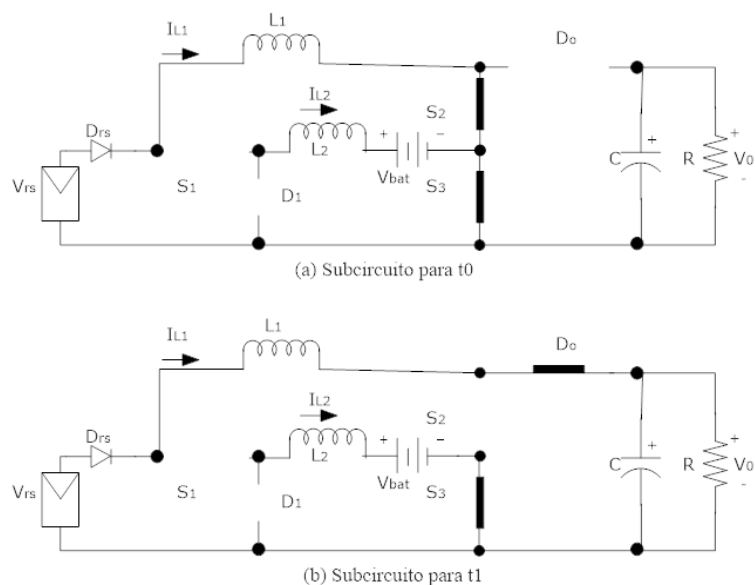


Figura 12. Subcircuitos cuando la energía se obtiene de la fuente renovable (modo 1.1, sin carga). Adaptado de A Different Three-Port DC/DC Converter for Standalone PV System (2014). Hindawi. Recuperado de: <https://new.hindawi.com/journals/ijp/2014/692934/>

Modo 1.2

El modo 1.2 se encuentra operando como se muestra en la figura 13, donde el interruptor  $S_3$  está activo mientras que  $S_1$  y  $S_2$  están conmutando lo cual tiene como resultado que  $V_{rs}$  alimente la carga y a su vez cargue la batería. Las ecuaciones resultantes en este modo son las siguientes:

$$\frac{di_{L1}}{dt} = \frac{V_{rs}}{L_1} - \frac{V_o}{L_1} (1 - ds_2) \quad \text{Ecuación 2.4}$$

$$\frac{di_{L2}}{dt} = \frac{V_{rs}}{L_2} ds_1 - \frac{V_{bat}}{L_2} \quad \text{Ecuación 2.5}$$

$$\frac{dV_o}{dt} = \frac{i_{L1}}{C} (1 - ds_2) - \frac{V_o}{RC} \quad \text{Ecuación 2.6}$$

$$V_o = \frac{V_{rs}}{(1-ds_2)} \quad \text{Ecuación 2.7}$$

$$V_{bat} = V_{rs} ds_1 \quad \text{Ecuación 2.8}$$

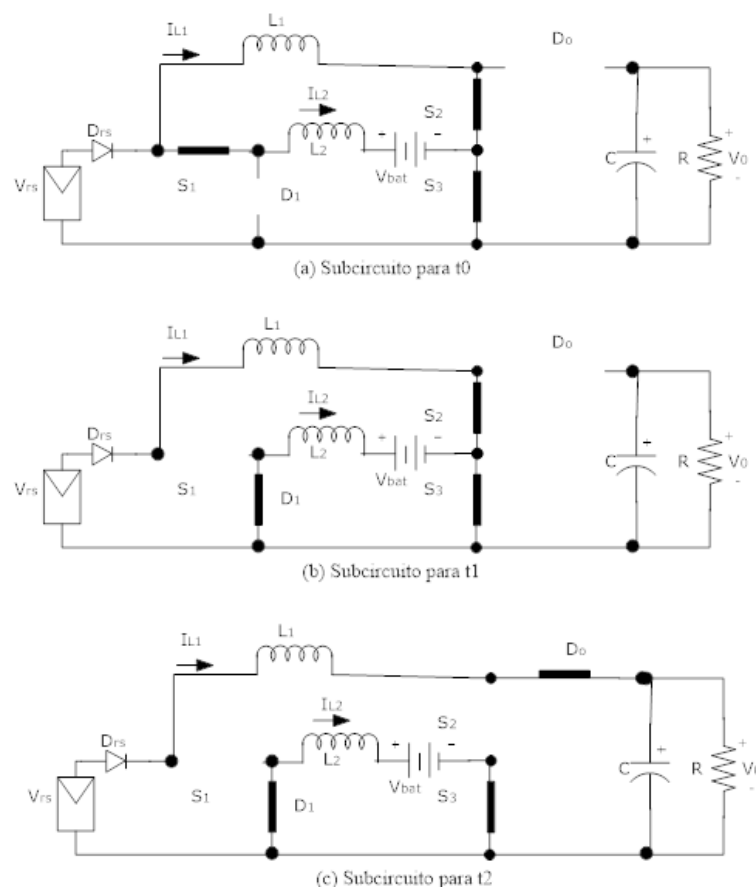


Figura 13. Subcircuitos cuando la energía se obtiene de la fuente renovable (modo 1.2, con carga). Adaptado de A Different Three-Port DC/DC Converter for Standalone PV System (2014). International Journal of Photoenergy. Recuperado de:

<https://new.hindawi.com/journals/ijp/2014/692934/>

**2.1.2. Modo 2: Energía entregada del conjunto de baterías.** En este modo de operación, la energía suministrada por el generador fotovoltaico no alcanza a suplir la energía total requerida por la carga. De esta manera, se consideran dos sub-modos. En el modo 2.1, tanto el generador fotovoltaico como la batería suministran potencia a la carga. Por otro lado, en el modo 2.2, solo la batería entrega potencia a la carga, dado que no se cuenta con generación fotovoltaica.

## Modo 2.1

En el modo 2.1, el cual se puede observar en la figura 14, el interruptor  $S_1$  permanece inactivo mientras que  $S_2$  y  $S_3$  están conmutando, lo cual tiene como resultado que  $V_{rs}$  y  $V_{bat}$  alimenten a la carga. Las ecuaciones resultantes en este modo son las siguientes:

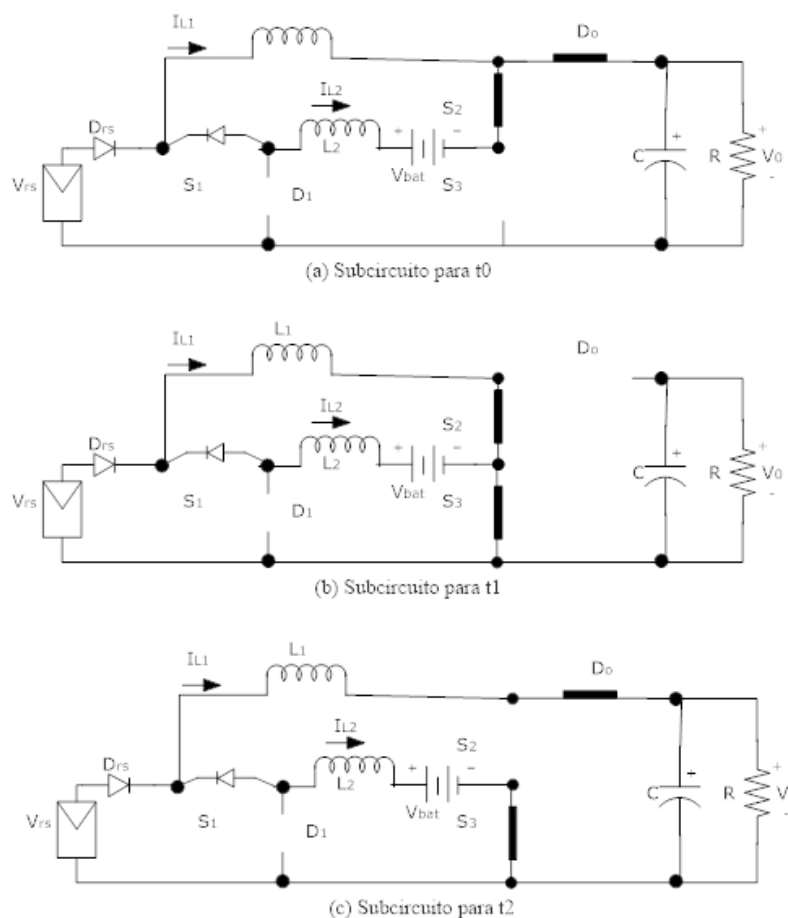
$$\frac{di_{L1}}{dt} = \frac{V_{rs}}{L_1} - \frac{V_o}{L_1} (2 - (ds_2 + ds_3)) \quad \text{Ecuación 2.9}$$

$$\frac{di_{L2}}{dt} = \frac{V_{rs} - V_{bat}}{L_2} - \frac{V_o}{L_2} (1 - ds_3) \quad \text{Ecuación 2.10}$$

$$\frac{dV_o}{dt} = \frac{i_{L1}}{C} (1 - ds_2 ds_3) ds_2 (1 - ds_3) - \frac{V_o}{RC} \quad \text{Ecuación 2.11}$$

$$V_o = \frac{V_{rs}}{(1 - ds_2 - ds_3)} \quad \text{Ecuación 2.12}$$

$$V_{bat} = V_{rs} - (1 - ds_3)V_o \quad \text{Ecuación 2.13}$$



*Figura 14.* Subcircuitos cuando la energía se obtiene de ambas fuentes (modo 2.1, energía disponible de fuentes renovables). Adaptado de A Different Three-Port DC/DC Converter for Standalone PV System (2014). International Journal of Photoenergy. Recuperado de: <https://new.hindawi.com/journals/ijp/2014/692934/>

### Modo 2.2

Según se observa en la figura 15, en el modo 2.2 el interruptor  $S_3$  permanece activo mientras que  $S_1$  permanece inactivo y  $S_2$  está conmutando, por lo que la carga es alimentada solo por la batería. Las ecuaciones correspondientes a este modo son las siguientes:

$$\frac{di_{L1}}{dt} = \frac{V_{bat}}{L_1+L_2} - \frac{V_o}{L_1+L_2} (1 - ds_2) \quad \text{Ecuación 2.14}$$

$$\frac{di_{L2}}{dt} = - \frac{di_{L1}}{dt} \quad \text{Ecuación 2.15}$$

$$\frac{dV_o}{dt} = \frac{i_{L1}}{C} (1 - ds_2) - \frac{V_o}{RC} \quad \text{Ecuación 2.16}$$

$$V_o = \frac{V_{bat}}{(1-ds_2)} \quad \text{Ecuación 2.17}$$

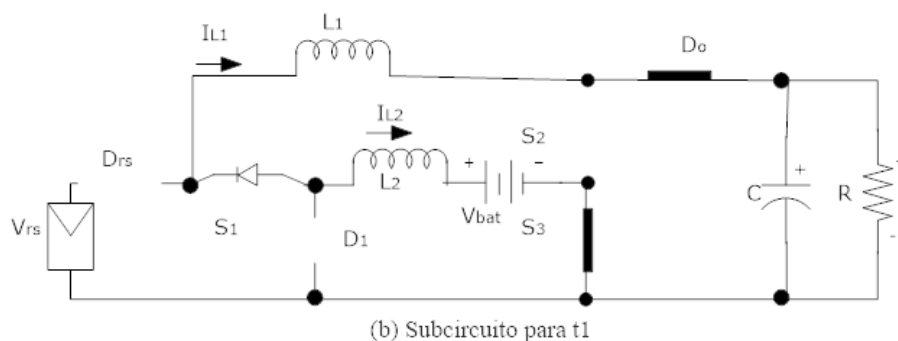
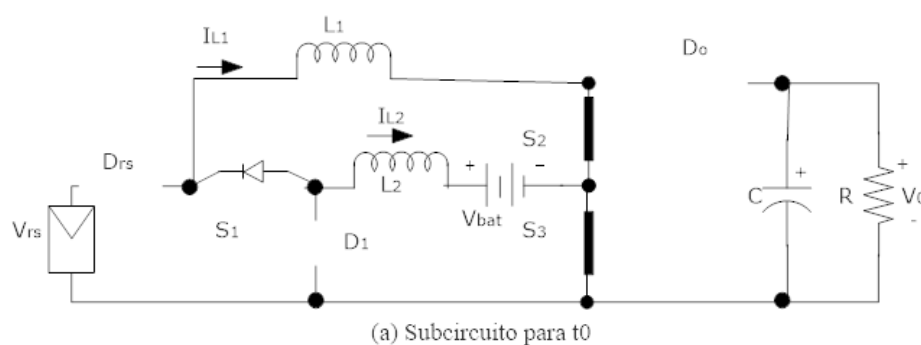


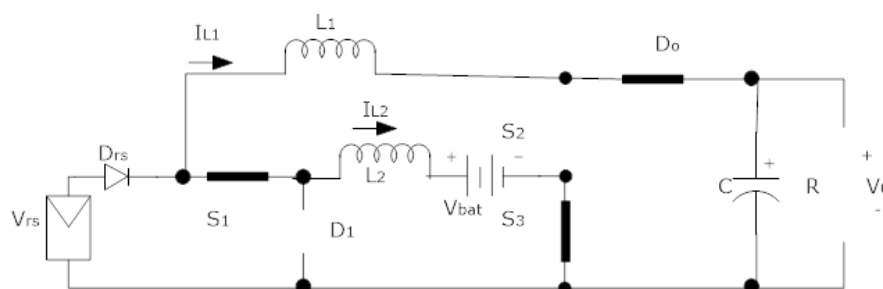
Figura 15. Subcircuitos cuando la energía se suministra desde el conjunto de batería (modo 2.2, solo batería). Adaptado de A Different Three-Port DC/DC Converter for Standalone PV System (2014). International Journal of Photoenergy. Recuperado de:

<https://new.hindawi.com/journals/ijp/2014/692934/>

**2.1.3. Modo 3: No hay energía disponible.** Para este caso, la carga está inactiva o desconectada. Este modo está dividido también en dos sub-modos:

#### Modo 3.1

Se puede contemplar que en la figura 16, la fuente renovable no transmite energía a la carga, pero si a la batería.



*Figura 16.* Subcircuitos (modo 3.1, batería cargando). Adaptado de A Different Three-Port DC/DC Converter for Standalone PV System (2014). International Journal of Photoenergy. Recuperado de: <https://new.hindawi.com/journals/ijp/2014/692934/>

#### Modo 3.2

En el modo 3.2 la fuente renovable y la batería no pueden suministrar energía a la carga lo cual se puede observar en la figura 17, ya que la energía es finita y depende de la batería y condiciones climáticas. Cuando esto ocurre el sistema está inactivo, y solo el conjunto de baterías podría ser cargadas (una vez que la fuente renovable esté disponible) mediante el modo 3.1.

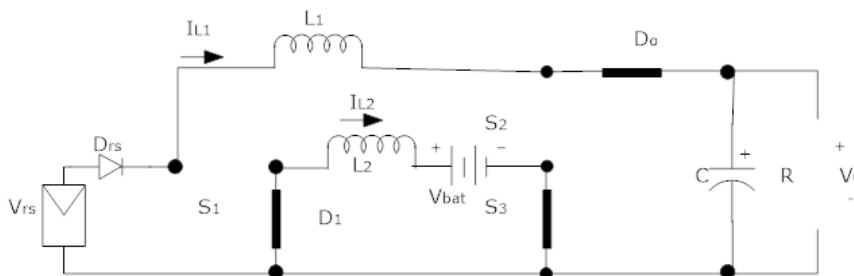


Figura 17. Subcircuitos (modo 3.2, sistema apagado). Adaptado de A Different Three-Port DC/DC Converter for Standalone PV System (2014). International Journal of Photoenergy. Recuperado de: <https://new.hindawi.com/journals/ijp/2014/692934/>

La ecuación correspondiente al modo 3 es la siguiente:

$$\frac{di_{L2}}{dt} = \frac{V_{rs}}{L_2} ds_1 - \frac{V_{bat}}{L_2} \quad \text{Ecuación 2.18}$$

$$V_{bat} = V_{rs} ds_1 \quad \text{Ecuación 2.19}$$

A continuación, se resume los estados de conmutación del convertidor

Tabla 2. Estados de conmutación del primer convertidor.

Modo de operación	Interruptores			Funcionamiento
	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	
<b>Modo 1</b>	0	X	1	Se alimenta la carga con V <sub>rs</sub>
	X	X	1	Carga de batería y se alimenta la carga con V <sub>rs</sub>
<b>Modo 2</b>	0	X	X	Se alimentando la carga con V <sub>rs</sub> y V <sub>bat</sub>
	0	X	1	Se alimentar la carga solo con V <sub>bat</sub>
<b>Modo 3</b>	1	0	1	Batería cargando
	0	0	1	Sistema apagado

Nota: "1" significa "encendido", "0" significa "apagado" y "X" significa "conmutación". Adaptado de A Different Three-Port DC/DC Converter for Standalone PV System (2014). International Journal of Photoenergy. Recuperado de <https://new.hindawi.com/journals/ijp/2014/692934/>

## 2.2. Segunda topología de convertidores DC-DC de tres puertos

El sistema correspondiente a la segunda topología está compuesto por tres interruptores ( $S_1$ ,  $S_2$  y  $S_3$ ), tres diodos ( $D_1$ ,  $D_2$  y  $D_3$ ), un inductor ( $L$ ) y un capacitor ( $C$ ), como se muestra en la Figura 18. Cada uno de los interruptores determina el funcionamiento del sistema; esto permite una fácil y buena administración de energía.

Al igual que la primera topología, la energía se proporciona principalmente de la fuente renovable, luego se considera el conjunto de baterías para garantizar el suministro de energía dado que el consumo de energía está restringido a un límite máximo (Vázquez et al, 2014, p. 3).

La operación del convertidor se divide en tres modos: DO, DI y SISO, expuestos a continuación. En esta descripción se consideran las siguientes variables:  $V_{rs}$  es la tensión de la fuente renovable,  $V_{bat}$  es la tensión en la batería,  $V_0$  es la tensión de salida,  $I_L$  es la corriente en la inductancia  $L$ ,  $C$  es el capacitor,  $L$  es el inductor,  $d_{s1}$  es el ciclo de trabajo del interruptor  $S_1$ ,  $d_{s2}$  es el ciclo de trabajo del interruptor de  $S_2$  y  $d_{s3}$  es el ciclo de trabajo del interruptor de  $S_3$ .

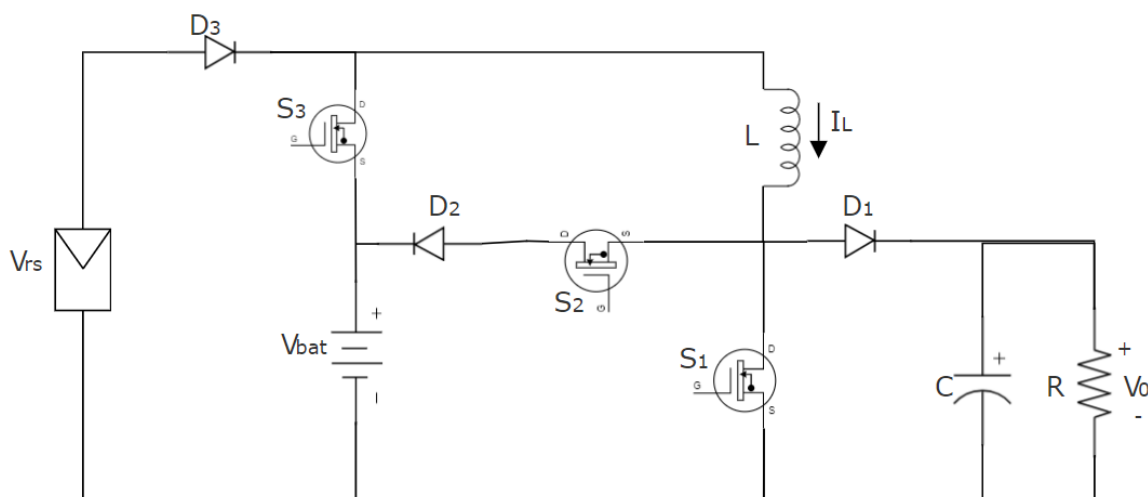


Figura 18. Esquema convertidor de tres puertos DC-DC (Segunda topología). Adaptado de Ding, Shun & Wu, Hongfei & Xing, Yan & Fang, Yu & Ma, Xudong. (2013). Topology and control of

a family of non-isolated three-port DC-DC converters with a bidirectional cell. Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC. 1089-1094.

**2.2.1. Modo DO.** En este modo, el generador fotovoltaico suministra potencia tanto a la carga, como a la batería.

En la figura 19 se puede apreciar el modo DO, en el cual el interruptor  $S_3$  permanece inactivo mientras que  $S_1$  y  $S_2$  conmutan, a partir de este arreglo la fuente  $V_{rs}$  está alimentando la carga y además está cargando la batería. Las ecuaciones correspondientes a este modo son las siguientes:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_{rs}}{L} - \frac{V_o}{L} (1 - ds_1 - ds_2) - \frac{V_{bat}}{L} ds_2 \quad \text{Ecuación 2.20}$$

$$\frac{dV_o}{dt} = \frac{i_L}{C} (1 - ds_1 - ds_2) - \frac{V_o}{RC} \quad \text{Ecuación 2.21}$$

$$V_o = \frac{V_{rs} - V_{bat} ds_2}{(1 - ds_1 - ds_2)} \quad \text{Ecuación 2.22}$$

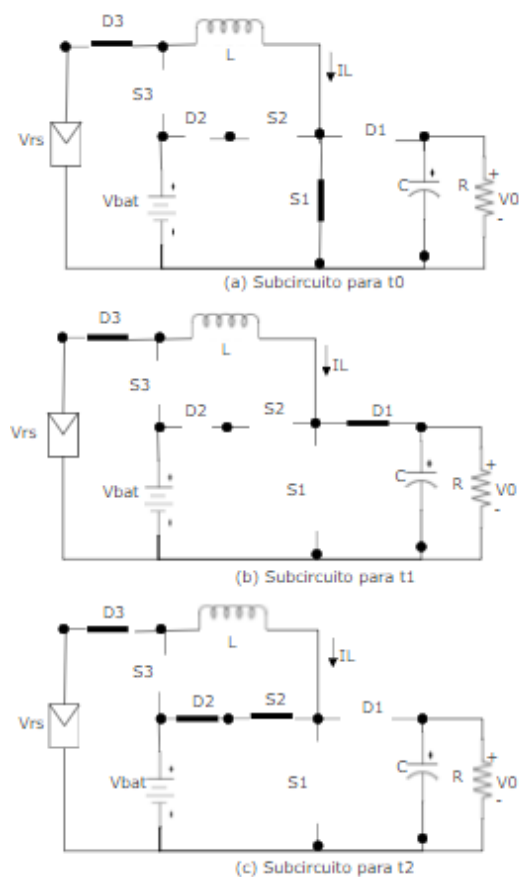


Figura 19. Subcircuitos (modo DO). Adaptado de Ding, Shun & Wu, Hongfei & Xing, Yan & Fang, Yu & Ma, Xudong. (2013). Topology and control of a family of non-isolated three-port DC-DC converters with a bidirectional cell. Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC. 1089-1094. 10.1109/APEC.2013.6520435.

**2.2.2. Modo DI.** En este modo, el generador fotovoltaico no es capaz de suplir el total de la energía requerida por la carga, por lo tanto, la batería suministra a la carga la energía restante.

En la figura 20 se puede apreciar el modo DI, en el cual el interruptor  $S_2$  permanece inactivo mientras que  $S_1$  y  $S_3$  conmutan, a partir de este arreglo la carga es alimentada por  $V_{rs}$  y  $V_{bat}$ . Las ecuaciones correspondientes a este modo son las siguientes:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_{rs}}{L} (1 - ds_3) - \frac{V_o}{L} (1 - ds_1) + \frac{V_{bat}}{L} ds_3 \quad \text{Ecuación 2.23}$$

$$\frac{dV_o}{dt} = \frac{i_L}{C} (1 - ds_1) - \frac{V_o}{RC} \quad \text{Ecuación 2.24}$$

$$V_o = \frac{V_{rs}(1-ds_3)+V_{bat} ds_3}{(1-ds_1)} \quad \text{Ecuación 2.25}$$

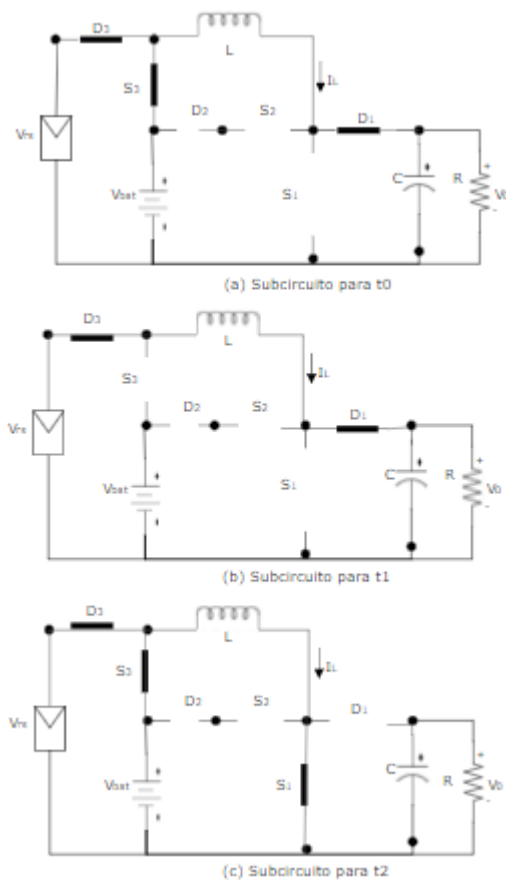


Figura 20. Subcircuitos (modo DI). Adaptado de Ding, Shun & Wu, Hongfei & Xing, Yan & Fang, Yu & Ma, Xudong. (2013). Topology and control of a family of non-isolated three-port DC-DC converters with a bidirectional cell. Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC. 1089-1094. 10.1109/APEC.2013.6520435.

**2.2.3. Modo SISO.** En este caso, la carga es alimentada solo por la batería dado que no se cuenta con recurso fotovoltaico.

La operación del modo SISO se puede apreciar en la figura 21, donde el interruptor  $S_2$  esta inactivo mientras que  $S_3$  permanece activo y  $S_1$  conmuta, este produce que la carga solo sea alimentada por la batería. Las ecuaciones correspondientes a este modo son las siguientes:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_{bat}}{L} - \frac{V_o}{L} (1 - ds_1) \quad \text{Ecuación 2.26}$$

$$\frac{dV_o}{dt} = \frac{i_L}{C} (1 - ds_1) - \frac{V_o}{RC} \quad \text{Ecuación 2.27}$$

$$V_o = \frac{V_{bat}}{(1-ds_1)} \quad \text{Ecuación 2.28}$$

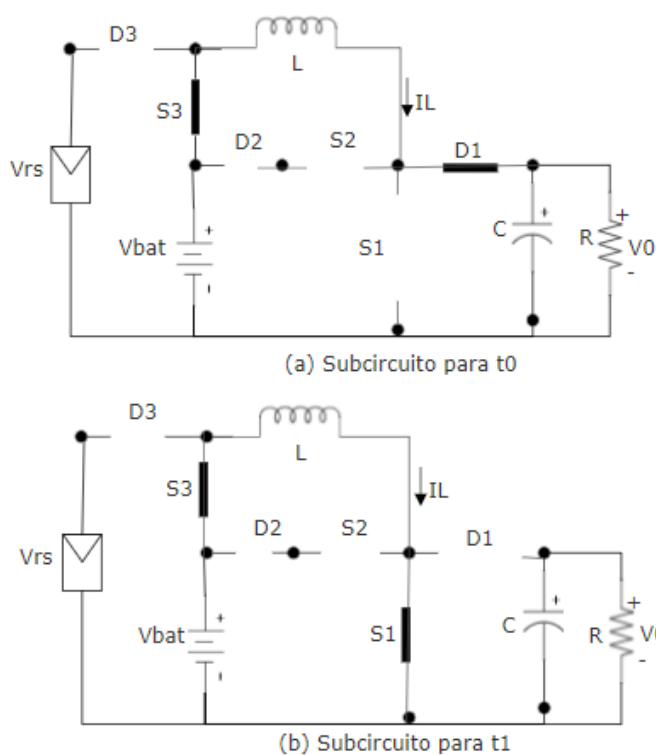


Figura 21. Subcircuitos (modo SISO). Adaptado de Ding, Shun & Wu, Hongfei & Xing, Yan & Fang, Yu & Ma, Xudong. (2013). Topology and control of a family of non-isolated three-port

DC-DC converters with a bidirectional cell. Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC. 1089-1094. 10.1109/APEC.2013.6520435.

A continuación, se resume los estados de conmutación del convertidor.

Tabla 3.

*Estados de conmutación del segundo convertidor.*

Modo de operación	Interruptores			Funcionamiento
	$S_1$	$S_2$	$S_3$	
<b>Modo DO</b>	X	X	0	Carga de batería y se alimenta la carga con $V_{rs}$
<b>Modo DI</b>	X	0	X	Se alimentando la carga con $V_{rs}$ y $V_{bat}$
<b>Modo SISO</b>	X	0	1	Se alimentando la carga con $V_{bat}$

Nota: Adaptado de Ding, Shun & Wu, Hongfei & Xing, Yan & Fang, Yu & Ma, Xudong. (2013). Topology and control of a family of non-isolated three-port DC-DC converters with a bidirectional cell. Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC. 1089-1094. 10.1109/APEC.2013.6520435.

### 3. Modelos y parámetros del sistema

Para evaluar el comportamiento de los convertidores DC-DC de tres puertos abordados en este trabajo de grado, se realizaron simulaciones en el software MATLAB/Simulink. A continuación, se describen los modelos de simulación empleados para realizar el análisis.

#### 3.1. Modelos de los paneles fotovoltaicos

Se generó el modelo del generador fotovoltaico mediante la herramienta Simulink el cual se encuentra en la librería Simscal/SpecializesPowerSystems/ Renewables/Solar y corresponde al siguiente bloque:

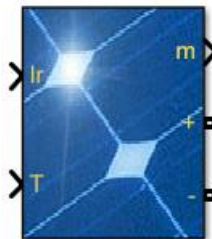


Figura 22. Bloque 'PV Array' Matlab-Simulink

Este bloque presenta el modelo de un arreglo de módulos fotovoltaicos (PV) a través de cadenas de celdas conectadas en paralelo y en serie, permitiendo modelar una generación fotovoltaica a gran escala.

El bloque 'PV Array' (Figura 20), presenta las siguientes señales de entrada y salida del modelo:

Tabla 4.

*Variables de entrada y salida de bloque 'PV Array'*

<b>Señal</b>		
<b><i>L<sub>r</sub></i></b>	Entrada	Se conecta la variación de la radiación solar en W/m <sup>2</sup>
<b><i>T</i></b>	Entrada	Se conecta la temperatura variable del generador en grados Celsius (°C).
<b><i>M</i></b>	Salida	Presenta las siguientes señales: <ul style="list-style-type: none"> <li>• V_PV: Tensión del generador fotovoltaico (V).</li> <li>• I_PV: Corriente del generador fotovoltaico (A).</li> </ul>

La selección del panel solar de serie 5MN6C175-A0 del fabricante Ably Tek, presenta las siguientes especificaciones, las cuales fueron usadas en el modelo:

Tabla 5.  
Especificaciones de panel solar 5MN6C175-A0

Serie	5MN6C175-A0
Fabricante	Ably Tek
Tipo	Monocristalino
Máxima potencia [W]	175
Tensión de circuito abierto $V_{oc}$ [V]	43.99
Corriente de corto circuito $I_{sc}$ [A]	5.17
Tensión del punto de máxima potencia $V_{mp}$ [V]	36.63
Corriente del punto de máxima potencia $I_{mp}$ [A]	4.78
Coefficiente de temperatura de $V_{oc}$ [%/°C]	-0.362
Coefficiente de temperatura de $I_{sc}$ [%/°C]	0.042

\* STC (Condiciones de prueba estándar): 1000 W/m<sup>2</sup>, 27°C.

Se consideró un arreglo de dos paneles conectados en serie, una sola rama. A continuación, se muestran las características (I-V) y (P-V) del arreglo dimensionado para irradiancia de 1000 W/m<sup>2</sup> a temperaturas de 25°C y 45°C.

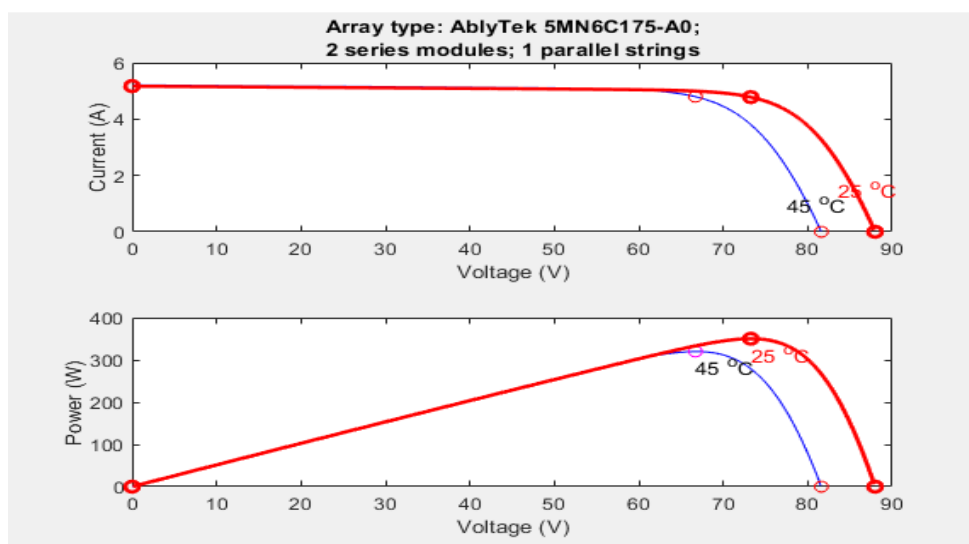


Figura 23. Curvas I-V y P-V del arreglo fotovoltaico

### 3.2. Parámetros de diseño

La primera topología fue diseñada para ser operada en modo de conducción continua. Las inductancias  $L_1$ ,  $L_2$  y el capacitor  $C$  se calcularon considerando la operación en el modo elevador, resultando las siguientes ecuaciones:

$$L_1 = \frac{V_{rs} d_{s2} T_s}{\Delta I_{L1}} \quad \text{Ecuación 3.1}$$

$$L_2 = \frac{(V_{rs} - V_{bat}) d_{s1} T_s}{\Delta I_{L2}} \quad \text{Ecuación 3.2}$$

$$C = \frac{V_0 (1 - d_{s2}) T_s}{\Delta V_0 R} \quad \text{Ecuación 3.3}$$

Donde  $T_s$  es el periodo de conmutación,  $\Delta I_{L1}$  es el rizo de la corriente por  $L_1$ ,  $\Delta I_{L2}$  es el rizo de la corriente por  $L_2$  y  $\Delta V_0$  es el rizo de la tensión en  $C$  o tensión en la carga. Los valores resultantes del diseño se presentan en la tabla 6, considerando un rizo del 40% del valor de continua para las corrientes de las bobinas bajo condiciones de  $1000 \text{ W/m}^2$  y  $27^\circ\text{C}$ . Asimismo, se consideró un rizo del 0.2% para la tensión del capacitor.

Con respecto a la segunda topología, se diseñaron sus elementos, a partir de modelo del convertidor *boost* tradicional, resultando las siguientes ecuaciones:

$$L = \frac{V_{rs} d_{s1} T_s}{\Delta I_L} \quad \text{Ecuación 3.4}$$

$$C = \frac{V_0 (1 - d_{s1}) T_s}{\Delta V_0 R} \quad \text{Ecuación 3.5}$$

Donde  $T_s$  es el periodo de conmutación,  $\Delta I_L$  es el rizo de la corriente por  $L$ , y  $\Delta V_0$  es el rizo de la tensión en  $C$  o tensión de salida. Los valores resultantes del diseño se presentan en la tabla 6, considerando un rizo del 40% del valor de continua para la corriente de la bobina bajo

condiciones de  $1000 \text{ W/m}^2$  y  $27^\circ\text{C}$ . Asimismo, se consideró un rizo del 0.2% para la tensión del capacitor.

Tabla 6.  
*Especificación de diseño*

Variable	Topología 1	Topología 2
Tensión de alimentación ( $V_{rs}$ )	73.26 V	73.26 V
Tensión de carga ( $V_0$ )	100 V	100 V
Tensión de batería ( $V_{bat}$ )	24 V	80 V
Frecuencia de conmutación (f)	50 kHz	100 kHz
Inductores (L)	980 $\mu\text{H}$	85 $\mu\text{H}$
Capacitores (C)	100 $\mu\text{F}$	470 $\mu\text{F}$

#### 4. Estrategia de control

Para cada una de las topologías de convertidores DC-DC de tres puertos analizadas en este trabajo, se implementa un esquema de control propio de cada una con el fin de garantizar el funcionamiento de las mismas. Estos controles integran diferentes estrategias que se “relevarán” unas a otras, en función de las necesidades impuestas por la carga del sistema, estado de la batería o la potencia entregada por la fuente renovable. A continuación, se mostrarán los diagramas de control de las topologías 1 y 2.

##### 4.1. Estrategia de control para la primera topología

En la topología 1 se implementa el diagrama de control mostrado en la figura 24. Este es conformado por tres controladores diferentes, el seguidor del punto de máxima potencia (MPPT por sus siglas en ingles), un seguidor del punto de mínima potencia (MinPPT) y un compensador PI para regular la tensión en los terminales de la carga, estos controladores gobiernan sobre los

interruptores  $S_1$ ,  $S_3$  y  $S_2$ , respectivamente. En esta estrategia de control se cuenta con un selector de modos (descrito en la sección 4.3), el cual, mediante el monitoreo del sistema, determina que controladores entrarán en funcionamiento (Vázquez *et al*, 2014, p. 3), esto hace que el control adquiera un grado de dificultad mayor al momento de la implementación, pero es ampliamente compensado por la capacidad que adquiere el convertidor para adaptarse a diferentes condiciones de funcionamiento.

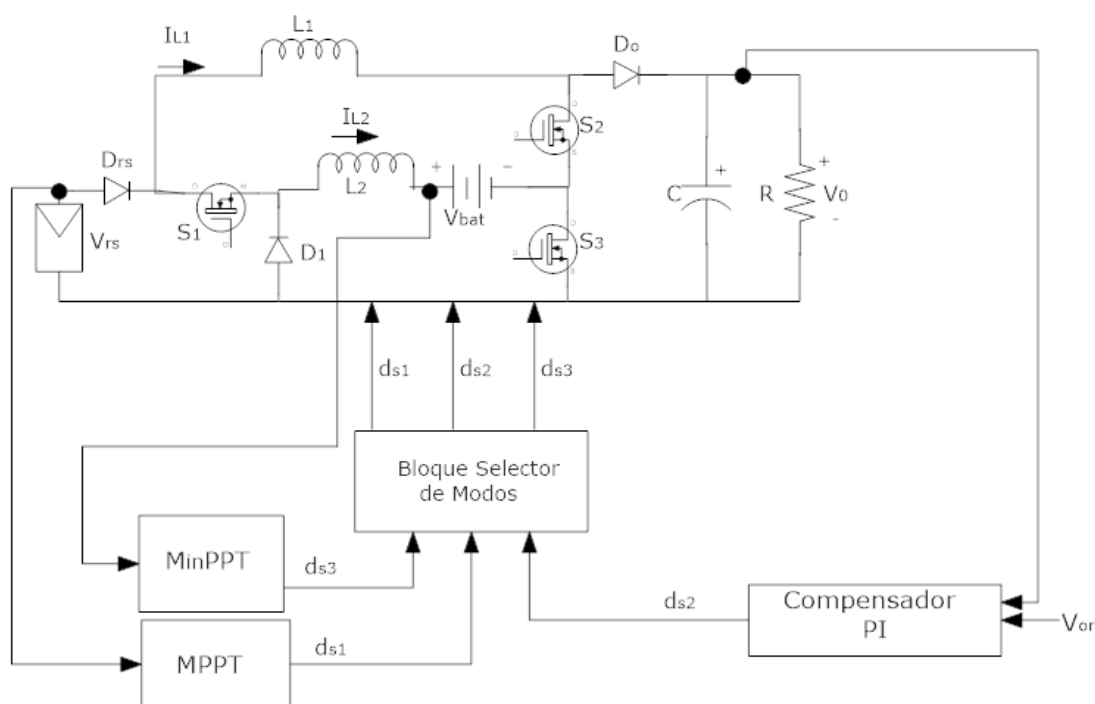


Figura 24. Diagrama de bloques del controlador (Primera topología). Adaptado de A Different Three-Port DC/DC Converter for Standalone PV System (2014). International Journal of Photoenergy. Recuperado de: <https://new.hindawi.com/journals/ijp/2014/692934/>

**4.1.1. Selector de modos.** Para realizar el control requerido por la operación del convertidor mostrado en la figura 25, fue necesario el diseño de un bloque que se encargará de determinar las señales de control que serán enviadas, estas señales provienen de los diferentes controladores implementados (Controladores MPPT, MinPPT y PI).

El funcionamiento del bloque selector de modos tiene en cuenta la cantidad de potencia disponible para entregar y la potencia requerida para alimentar las cargas que están conectadas al sistema, para esto se hace necesaria la adquisición de las variables que reflejen el estado de funcionamiento del convertidor, señales tales como tensión y corriente en las entradas y salidas permiten al bloque conocer la potencia requerida y con base en esto, tomar la decisión del modo de funcionamiento que supliría las necesidades del sistema de la forma más adecuada.

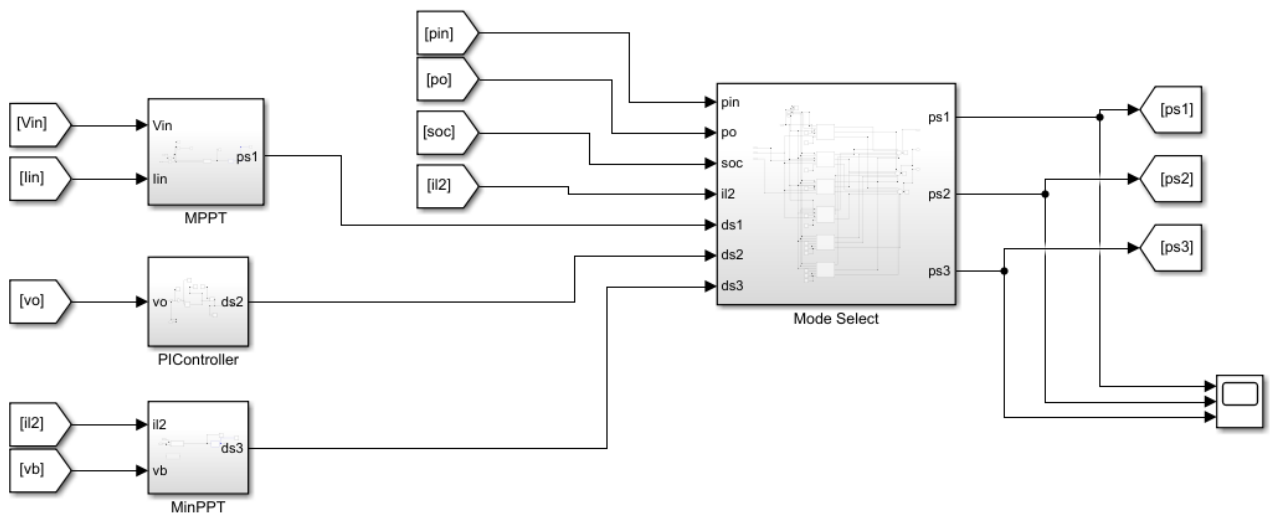


Figura 25. Selector de modos (Topología 1)

A continuación, se mostrará una tabla donde se muestra la lógica que utiliza este bloque, con el propósito de comprender mejor su funcionamiento:

Tabla 7.

*Condiciones de funcionamiento del selector de modos*

Condiciones de activación					
Modo	Sub-Modo	$P_{in}$	$P_o$	SOC [%]	$I_{L2}$
1	1.1	NR	NR	$\geq 99$	$\leq 0$
	1.2	$\geq P_o$	$\leq P_{in}$	$< 99$	$\leq 0$
2	2.1	$> 0$	NR	$\geq 40$	$> 0$
	2.2	$\leq 0$	NR	$\geq 40$	$> 0$
3	3.1	NR	$\leq 0$	$< 100$	NR
	3.2	$= 0$	$= 0$	$= 100$	NR

Nota:  $P_{in}$ = Potencia de entrada,  $P_o$ =Potencia de salida, SOC= Estado de carga de la batería,  $I_{L2}$ =Corriente en el inductor 2, NR= No requerido.

#### 4.2. Estrategia de control para la segunda topología

En la topología 2 se tiene un sistema de control más simple (figura 26), este emite dos señales de control llamadas  $V_{c1}$  y  $V_{c2}$ , las cuales adquieren su valor dependiendo de las señales provenientes de los controladores que componen el sistema; se cuentan con 3 controladores PI y un seguidor de punto de máxima potencia (MPPT). Dos de los controladores PI están conectados en paralelo y funcionan como reguladores de tensión y corriente de la batería, estos se encargan de limitar valores de tensión y corriente en la misma para garantizar una vida útil más larga, estos se relevan mutuamente en función del parámetro alcance su limitante (ambos controladores no pueden gobernar sobre los interruptores a la vez). Mientras estas limitantes no sean sobrepasadas, el MPPT será quien determine el valor de  $V_{c1}$ . También se cuenta con un controlador PI encargado de regular la tensión a la salida del convertidor (*Output Voltage Regulator*) que controlará la señal  $V_{c2}$  para garantizar una tensión de operación para las cargas que se requieran conectar. Adicionalmente se cuenta con un monitoreo de la tensión en el generador fotovoltaico, la cual hace que se garantice una tensión mínima de operación para que el algoritmo MPPT pueda entrar en funcionamiento, de lo contrario el MPPT se desactiva.

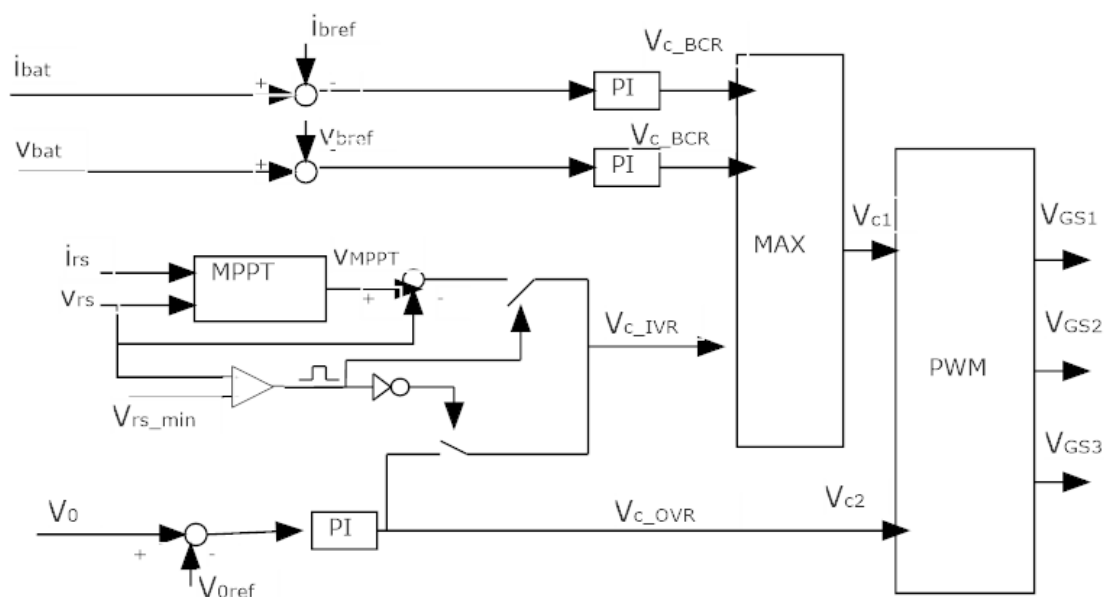


Figura 26. Diagrama de bloques del controlador (Segunda topología). Adaptado de Ding, Shun & Wu, Hongfei & Xing, Yan & Fang, Yu & Ma, Xudong. (2013). Topology and control of a family of non-isolated three-port DC-DC converters with a bidirectional cell. Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC. 1089-1094. 10.1109/APEC.2013.6520435.

Las señales de control  $V_{c1}$  y  $V_{c2}$  que entran al bloque PWM se comparan con las señales Carrier  $V_{i1}$ ,  $V_{i2}$  y  $V_{i3}$  de la manera en que se muestra en la Figura 27 para generar los pulsos de control que se enviarán a los interruptores  $S_1$ ,  $S_2$ , y  $S_3$ . La forma en que estas señales interactúan entre sí es mostrada en la Figura 28, en esta se puede apreciar como  $V_{c1}$  y  $V_{c2}$  generan los pulsos de control.

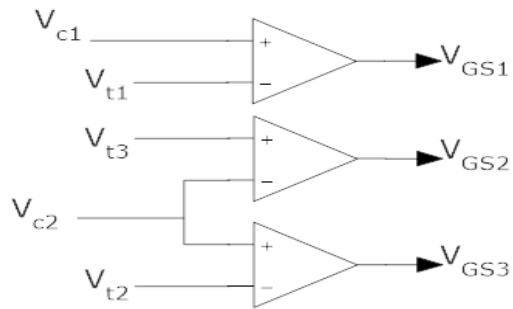


Figura 27. Bloque PWM

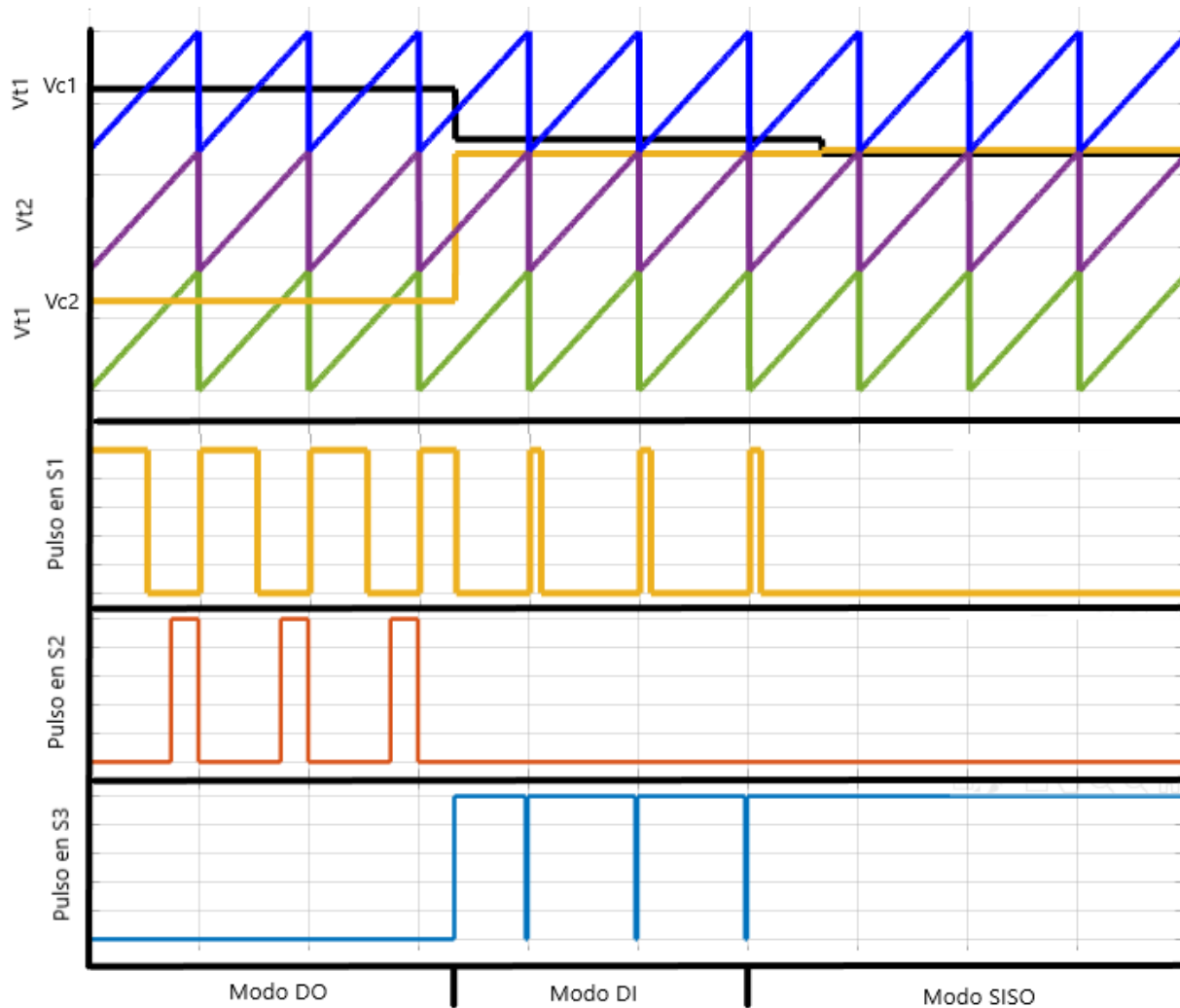


Figura 28. Señal de control de interruptores de la topología 2

### 4.3. Controladores

En ambas topologías se cuenta con una estrategia de control que implica más de un controlador, compartiendo algunos de ellos debido a que son esenciales en una instalación fotovoltaica. Controladores tales como lo son el regulador de tensión en terminales (OVR) y el seguidor del punto de máxima potencia (MPPT) hacen presencia como pilar del control del sistema fotovoltaico. También se cuentan con controladores que no son comunes a las dos topologías, esto para adaptarse a la estructura de su topología y lograr un mejor desempeño. El algoritmo seguidor del punto de mínima potencia es incorporado en la topología 1 para garantizar que la batería entregue la menor cantidad de potencia posible, maximizando la entrada desde la fuente renovable. A continuación, se profundizará un poco más en los controladores antes mencionados con el propósito de entender su papel dentro de la estrategia de control.

**4.3.1. Control PI.** A continuación, se describirá el modelo del convertidor *boost* del cual se obtuvieron los parámetros para calcular las constantes del control proporcional integral (PI), el cual se va a utilizar para controlar la tensión de salida de la carga para las dos topologías y a sí mismo en la topología 2 para controlar el flujo de potencia en la batería (Cardona S., Herrera Ospina S., 2015, p.18).

Donde cada variable corresponde a:

$V_{rs}$ : Tensión de entrada

$V_O$ : Tensión de salida;  $i_o$ : Corriente en la resistencia; R: Resistencia

$V_C$ : Tensión en el capacitor;  $i_C$ : Corriente en el capacitor; C: Capacitor

$V_L$ : Tensión en el inductor;  $i_L$ : Corriente en el inductor; L: Inductor

$\Delta I_L$ : Rizo de la corriente  $i_L$ ;  $\Delta V_O$ : Rizo de la tensión  $V_O$

D: Ciclo de trabajo del interruptor

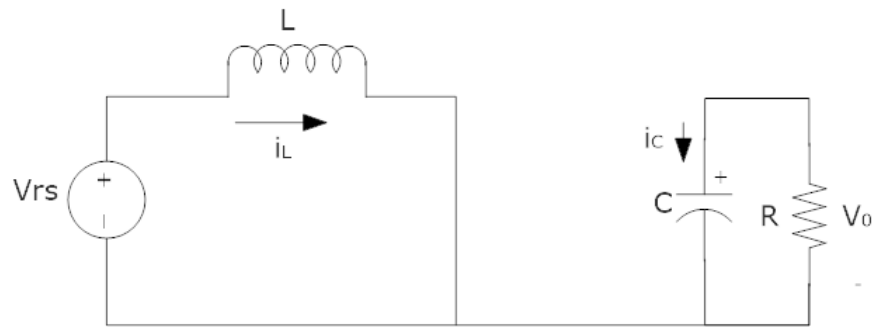


Figura 29. Esquema convertidor elevador, con interruptor cerrado

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_{rs}}{L} \quad \text{Ecuación 4.1}$$

$$\frac{dV_o}{dt} = -\frac{V_o}{RC} \quad \text{Ecuación 4.2}$$

Para el interruptor abierto las ecuaciones son las siguientes:

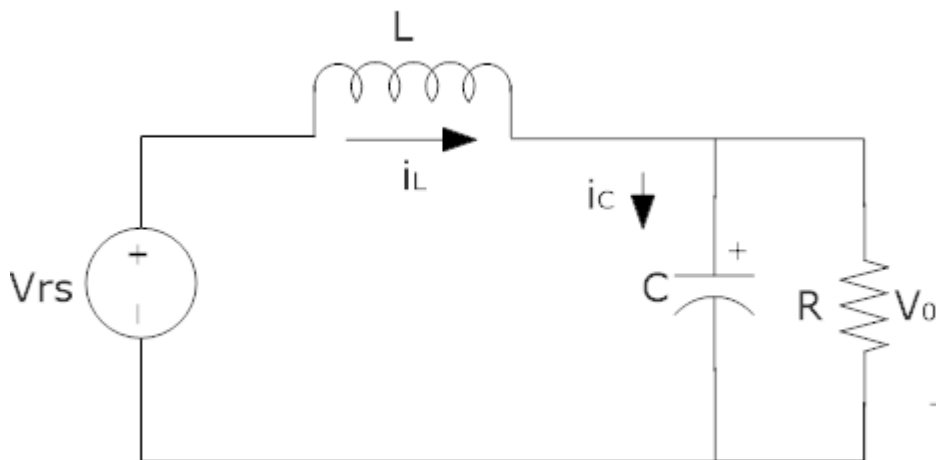


Figura 30. Esquema convertidor elevador, con interruptor abierto

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_{rs} - V_o}{L} \quad \text{Ecuación 4.3}$$

$$\frac{dV_o}{dt} = \frac{i_L}{C} - \frac{V_o}{RC} \quad \text{Ecuación 4.4}$$

Parámetros:

Se expresa el sistema de ecuaciones en un único sistema bilineal. Para esto se define un parámetro  $\mu(t)$  (Cardona S., Herrera Ospina S., 2015, p.19) así:

$\mu(t)=0$ , cuando el interruptor no conduce.

$\mu(t)=1$ , cuando el interruptor conduce.

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_{rs}}{L} - \frac{V_o}{L} * \mu(t) \quad \text{Ecuación 4.5}$$

$$\frac{dV_o}{dt} = \frac{i_L}{C} * \mu(t) - \frac{V_o}{RC} \quad \text{Ecuación 4.6}$$

Promediar:

Se utiliza un método de promediado, para simplificar las ecuaciones que rigen la dinámica del convertidor de la siguiente manera:

$$\langle x_{(t)} \rangle = \frac{1}{T_S} \int_t^{t+T_S} x_{(\tau)} d\tau \quad \text{Ecuación 4.7}$$

Ahora se encuentran los valores promedios de  $v_l(t)$  y de  $i_c(t)$

$$\langle v_{l(t)} \rangle = \frac{1}{T_S} \int_t^{t+T_S} v_{l(\tau)} d\tau \quad \text{Ecuación 4.8}$$

$$\langle i_{c(t)} \rangle = \frac{1}{T_S} \int_t^{t+T_S} i_{c(\tau)} d\tau \quad \text{Ecuación 4.9}$$

De las ecuaciones (4.8) y (4.9), se llega al resultado del sistema promediado así:

$$\frac{di_L(t)}{dt} = \frac{V_{rs}}{L} - \frac{V_o}{L} * u(t) \quad \text{Ecuación 4.10}$$

$$\frac{dV_o(t)}{dt} = \frac{i_L}{C} * u(t) - \frac{V_o}{RC} \quad \text{Ecuación 4.11}$$

Linealización:

Para la linealización del sistema se aplica la expansión por series de Taylor.

$$\Delta \dot{x}_j = \sum_{k=1}^n \frac{\delta f_j}{\delta x_k} \Big|_{x_0, u_0} (x_k - x_{k0}) + \sum_{k=1}^n \frac{\delta f_j}{\delta u_k} \Big|_{x_0, u_0} (u_k - u_{k0}) \quad \text{Ecuación 4.12}$$

Para que el modelo en pequeña señal quede adecuadamente linealizado, se encuentran los valores promedios de las variables de interés, y se trabaja alrededor de un punto de operación fijo en estado estable, así:  $V_{s0}$ ,  $I_{L0}$  y  $V_{o0}$ .

Se muestra en las siguientes ecuaciones los deltas o cambios de la variable:

$$\Delta V_{s(t)} = V_{s(t)} - V_{s0} \quad \text{Ecuación 4.13}$$

$$\Delta i_{L(t)} = i_{L(t)} - I_{L0} \quad \text{Ecuación 4.14}$$

$$\Delta V_{0(t)} = V_{0(t)} - V_{00} \quad \text{Ecuación 4.15}$$

Se procede a linealizar mediante la expansión de las series de Taylor, derivando parcialmente sobre los valores promedios de las ecuaciones (4.10) y (4.11). Quedando linealizado el sistema así (Cardona S., Herrera Ospina S., 2015, p.21):

$$\Delta \dot{i}_{L(t)} = \frac{1}{L} \Delta V_{s(t)} - \frac{U_0}{L} \Delta V_{0(t)} - \frac{V_{00}}{L} \Delta u(t) \quad \text{Ecuaciones 4.16}$$

$$\Delta \dot{v}_{o(t)} = \frac{U_0}{L} \Delta i_{L(t)} - \frac{1}{RC} \Delta V_{0(t)} - \frac{i_{L0}}{C} \Delta u(t) \quad \text{Ecuaciones 4.17}$$

Espacio de estados:

Al tener el sistema linealizado se puede expresar en el espacio de estados, primero se hace el cambio a variables de estado:

$$\Delta x_1 = \Delta i_L; \quad \Delta x_2 = \Delta v_0; \quad \dot{\Delta x}_1 = \dot{\Delta i}_L; \quad \dot{\Delta x}_2 = \dot{\Delta v}_0$$

El espacio de estados que representa la dinámica del sistema lineal es:

$$\dot{\Delta x} = A \Delta x + U \Delta u \quad \text{Ecuación 4.18}$$

$$\Delta y = C \Delta x + D \Delta u \quad \text{Ecuación 4.19}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\Delta x}_1 \\ \dot{\Delta x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{U_o}{L} \\ \frac{U_o}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & -\frac{V_{o0}}{L} \\ 0 & -\frac{i_{L0}}{C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U \\ \Delta U \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 4.20}$$

$$[\Delta v_0] = [0 \ 1] \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 4.21}$$

Función de transferencia:

$$s\Delta i_{L(t)} = \frac{1}{L}\Delta V_{s(t)} - \frac{U_o}{L}\Delta V_{0(t)} - \frac{V_{o0}}{L}\Delta U_{(t)} \quad \text{Ecuaciones 4.22}$$

$$s\Delta v_{o(t)} = \frac{U_o}{C}\Delta i_{L(t)} - \frac{1}{RC}\Delta V_{0(t)} + \frac{i_{L0}}{C}\Delta U_{(t)} \quad \text{Ecuaciones 4.23}$$

$$\Delta v_{0(s)} = \frac{U_o}{LC} \frac{1}{s^2 + \frac{1}{RC}s + \frac{U_o^2}{LC}} \Delta v_{s(s)} + \frac{1}{LC} \frac{(i_{L0}Ls - U_oV_{o0})}{s^2 + \frac{1}{RC}s + \frac{U_o^2}{LC}} \Delta U_{(s)} \quad \text{Ecuaciones 4.24}$$

En la ecuación (4.24) se puede observar que la dinámica del sistema se define por dos funciones de transferencia, una donde la entrada es el cambio de la tensión de entrada y la otra cuya entrada es el cambio en el ciclo de trabajo (Cardona S., Herrera Ospina S., 2015, p.22).

La función de transferencia que relaciona la salida de tensión del convertidor, con la entrada del cambio de ciclo de trabajo es:

$$G_o(s) = \frac{\Delta v_{0(s)}}{\Delta U_{(s)}} = \frac{V_{rs}}{RC(1-D)^2} * \frac{\frac{R(1-D)^2}{L} - s}{s^2 + \frac{s}{RC} + \frac{(1-D)^2}{LC}} \quad \text{Ecuaciones 4.25}$$

Del proceso de modelado del convertidor elevador el cual tiene una forma de segundo orden y después de la parametrización, la función de transferencia de bucle cerrado se puede definir como en (4.25). La función C(s) se puede derivar como se muestra en la ecuación 4.26.

(Weidong Xiao, 2017, p.229)

$$C(s) = \frac{f(s)*Go(s)^{-1}}{1-f(s)} \quad \text{Ecuaciones 4.26}$$

$$C(s) = \frac{n_2s^2n_1s+n_0}{d_2s^2+d_1s} \quad \text{Ecuaciones 4.27}$$

El controlador que se muestra en (4.26) se puede expresar en formato PI como

$$C(s) = Kp + \frac{Ki}{s} \quad \text{Ecuaciones 4.28}$$

Donde, los parámetros PI pueden derivarse de la ecuación 4.27 como:

$$Kp = \frac{n_1d_1+n_0d_2}{d_1^2} \quad \text{Ecuaciones 4.29}$$

$$Ki = \frac{n_0}{d_1} \quad \text{Ecuaciones 4.30}$$

Remplazando los valores numéricos en las ecuaciones anteriores se obtuvo los valores correspondientes a las constantes de PI de cada una de las topologías, estos valores se pueden observar en la tabla 8:

Tabla 8.  
*Constantes del controlador PI para cada topología.*

Topología	Constantes del controlador PI		Control que ejerce en la topología
	$K_p$	$K_i$	
topología 1	0.0238	11.4444	Controlador de tensión en terminales (OVR)
topología 2	4.8678e-05	15.2593	Controlador de tensión en terminales (OVR)
	5.4719e-05	20.600	Controlador de tensión y corriente de carga (BVR&BCR)

**4.3.2. Control MPPT P&O.** El control MPPT P&O se basa en realizar una modificación en el estado del sistema mediante una perturbación ingresada al mismo y mediante la medición de las variables de corriente y tensión, comprobar si la potencia ha tenido una variación positiva o negativa, esto se repetirá hasta que el algoritmo determine que se ha alcanzado el punto en el que se extrae la máxima potencia posible de la fuente (J, Ruiz & A, Beristáin & Sosa Tinoco, Ian & H, Hernandez. (2010). Estudio del Algoritmo de Seguimiento de Punto de Máxima Potencia Perturbar y Observar. Revista de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación 1870-9532. 8. 17.), en la figura 31 se puede apreciar el algoritmo implementado para este caso en específico.

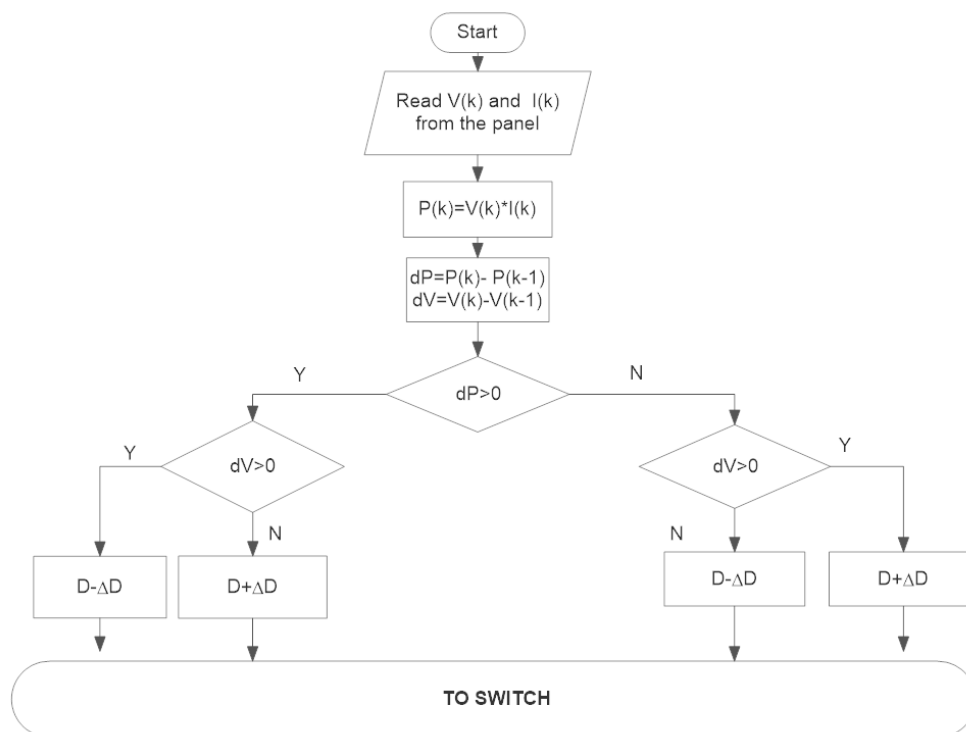


Figura 31. Control MPPT P&O

**4.3.3. Control MinPPT P&O.** El sistema se centró en obtener la potencia mínima desde el conjunto de baterías para asegurarse de que la máxima energía sea entregada desde la fuente renovable, donde esta condición se logra fácilmente conmutando el interruptor  $S_1$ . Por lo tanto, se considera como un seguidor del punto de mínima potencia (MinPPT) para el conjunto de baterías; no se requiere conocer la energía de la batería, ya que la tensión establecido de la batería es casi constante, y luego solo la corriente del conjunto de baterías es usada para realizar el control (Vázquez *et al*, 2014, p. 9).

Se muestra el diagrama de flujo del algoritmo MinPPT propuesto en la Figura 32 como la corriente es la única variable medida, la técnica propuesta se vuelve más simple que otros métodos. Una vez que se detecta que la batería está en uso y entregando energía a la carga, el algoritmo entra en funcionamiento; entonces el ciclo de trabajo de  $S_3$  comienza a variar. Al principio el ciclo de trabajo se inicializa en un valor y luego disminuye hasta que se obtenga la potencia mínima; el sistema permanece ejecutando en el MinPPT hasta la corriente de la batería es cero esto significa que la fuente renovable es capaz de entregar la suficiente energía y no se requiere que el conjunto de baterías supla el déficit, este cambio se da gracias a un bloque selector de modos del cual se habló anteriormente. Después de obtener el ciclo de trabajo, se introduce en un PWM y este a su vez generará la señal que controlará el interruptor  $S_3$  (Vázquez *et al*, 2014, p. 9).

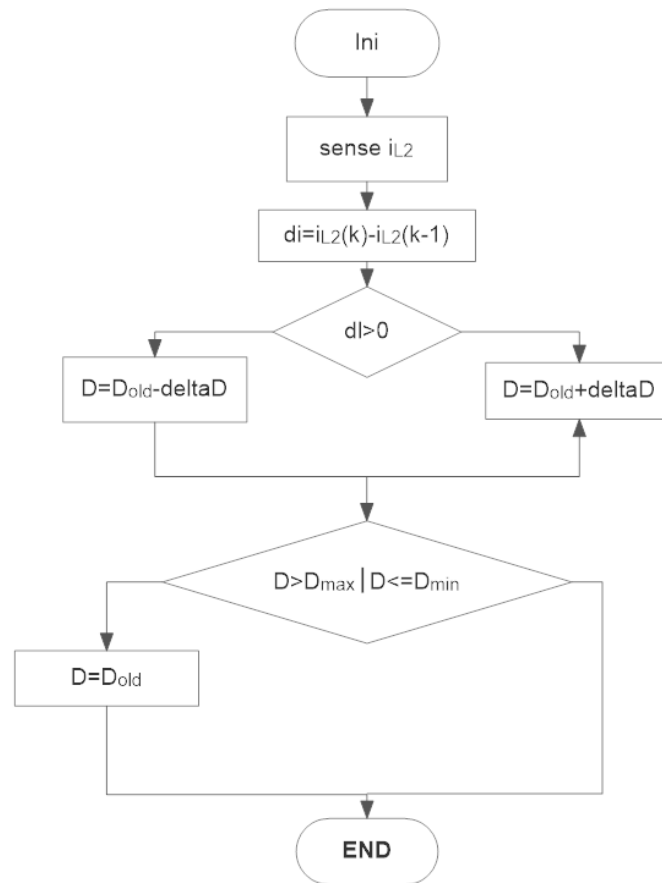


Figura 32. Control MinPPT P&O

## 5. Resultados

A continuación, se mostrarán los resultados obtenidos en la simulación de ambas topologías con su respectivo control, observando el comportamiento de estas en diferentes situaciones, esto con el propósito de observar si su comportamiento concuerda con lo esperado y comprobar si la estrategia de control conmuta al estado que se mejor adapte a la oferta y demanda de energía en el sistema mediante la observación de los pulsos de control que activan los interruptores  $S_1$ ,  $S_2$  y  $S_3$ .

Análisis de resultados topología 1

### Modo 1.1

Para este modo se obtiene un sistema SISO puesto que la batería se encuentra cargada totalmente y la energía obtenida del panel fotovoltaico es suficiente para alimentar la demanda de la carga y por ende el algoritmo de máxima potencia no es requerido y se observa en la figura 33 que la tensión en el mismo está lejos de este punto (tabla 6).

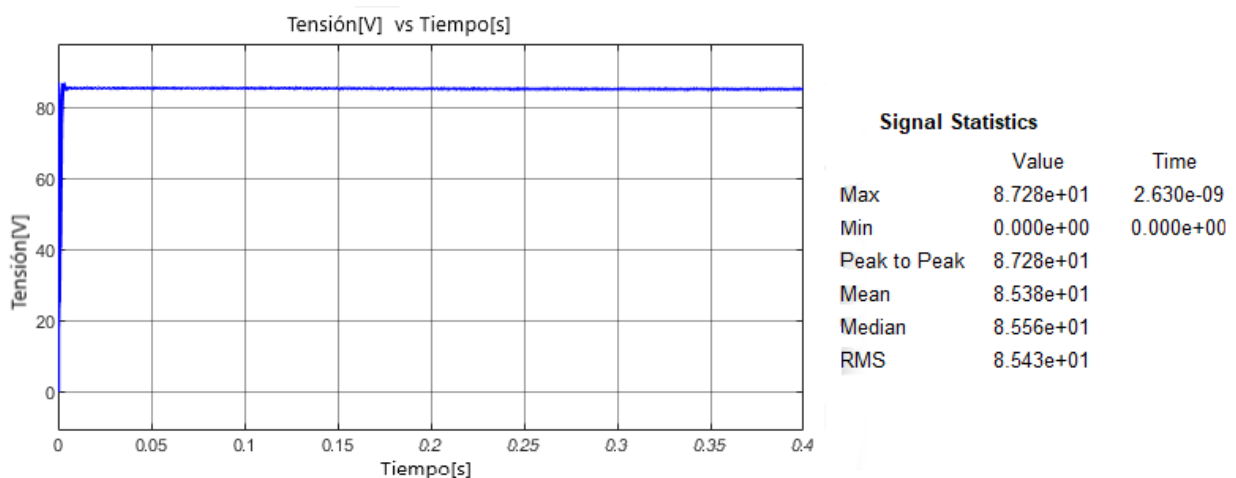


Figura 33. Tensión en el panel en el modo 1.1 (Topología 1)

Para esta etapa el selector de modos activa el regulador de la tensión de salida (OVR) mientras que los demás controladores permanecen inactivos y en su lugar, una señal constante es enviada a los interruptores que les corresponde controlar, estos pulsos se pueden observar en la figura 34.

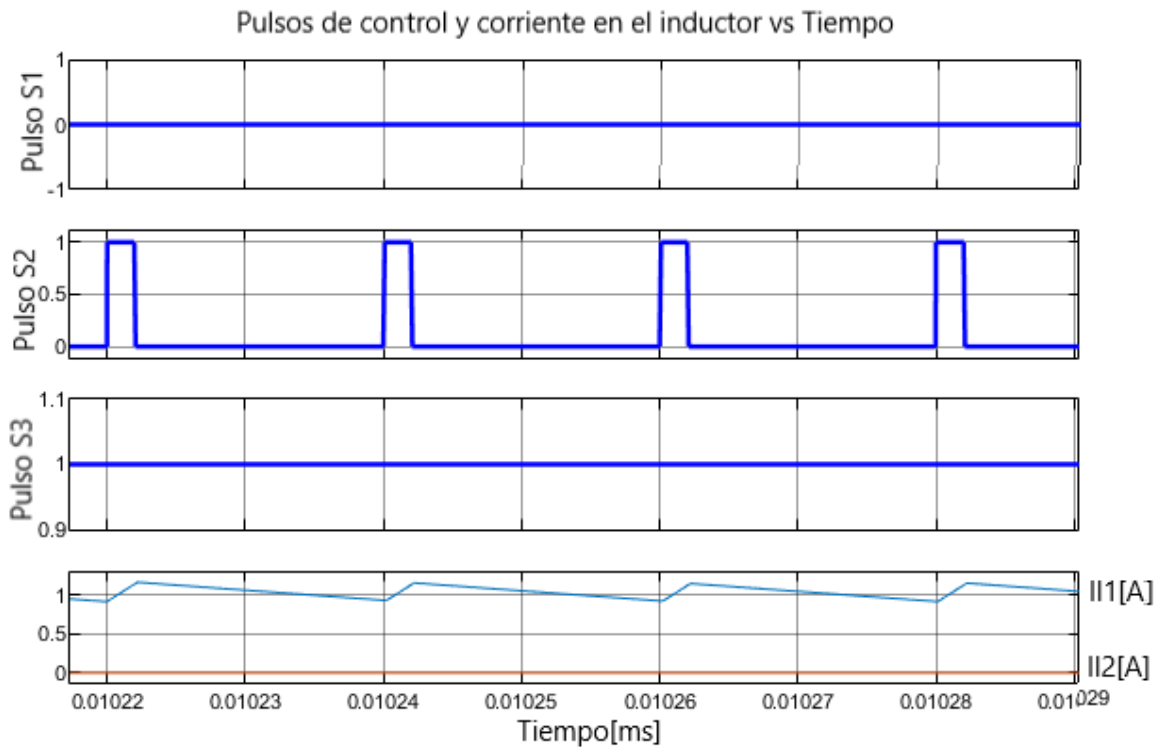


Figura 34. Pulsos de control ( $S1$ ,  $S2$ ,  $S3$ ) y corrientes en los inductores ( $IL1$ ,  $IL2$ ) para el modo 1.1 (Topología 1).

Como el regular de tensión de salida (OVR) es el único controlador en funcionamiento, se puede ver que la tensión a la salida se encuentre siguiendo la referencia y, por ende, consumiendo la potencia especificada para la misma (100W)

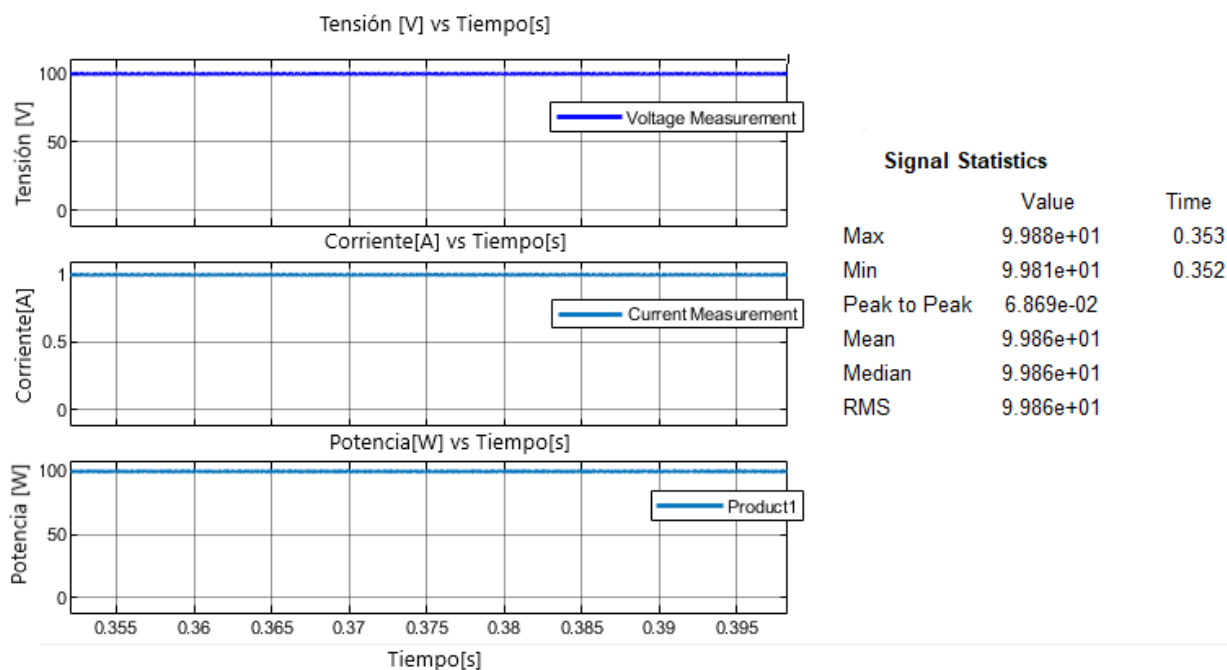


Figura 35. Tensión, corriente y potencia de salida para el modo 1.1 (Topología 1).

### Modo 1.2

En este punto se obtiene un sistema DO, la potencia obtenida del panel fotovoltaico es suficiente para alimentar la carga y la batería tiene un estado de carga inferior al 100%, esto permite que un algoritmo MPPT intervenga, llevando el panel fotovoltaico a una tensión cercana al punto de máxima potencia, tal y como se puede observar en la figura 36.

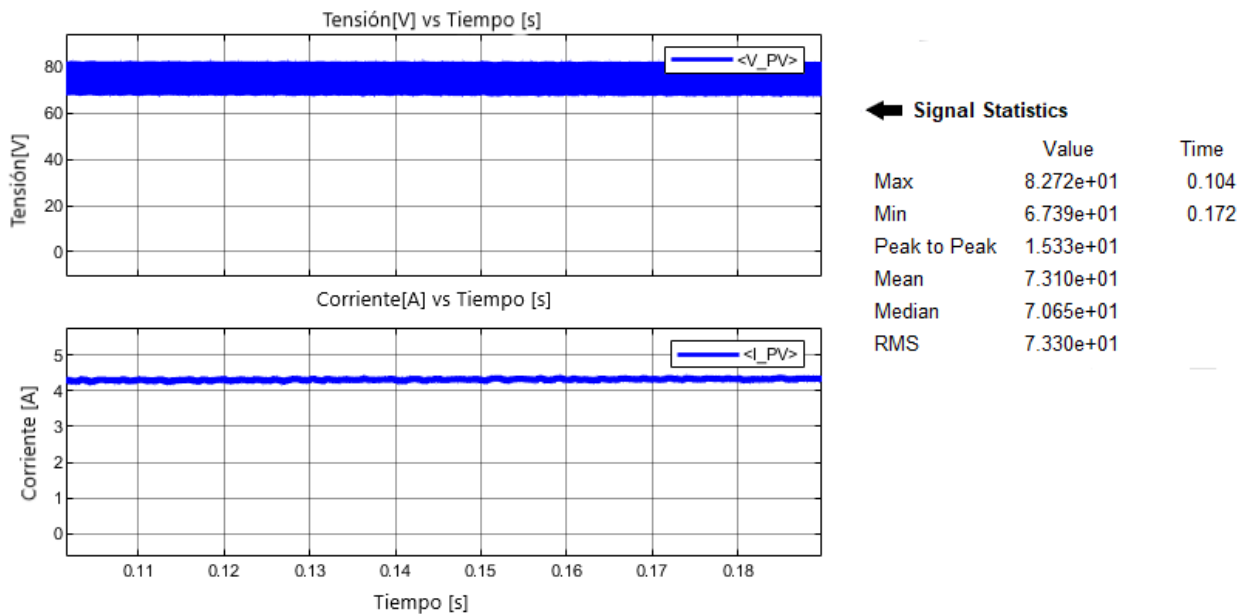


Figura 36. Tensión y corriente en el panel en el modo 1.2 (Topología 1).

A su vez se puede observar que el estado de carga de la batería asciende respecto al tiempo de una manera constante, tal y como se aprecia en la figura 37, adicionalmente en la gráfica de tensión y corriente en la batería mostrada en la Figura 38 se aprecia una corriente negativa, esta denota que la batería está consumiendo potencia en lugar de entregarla.

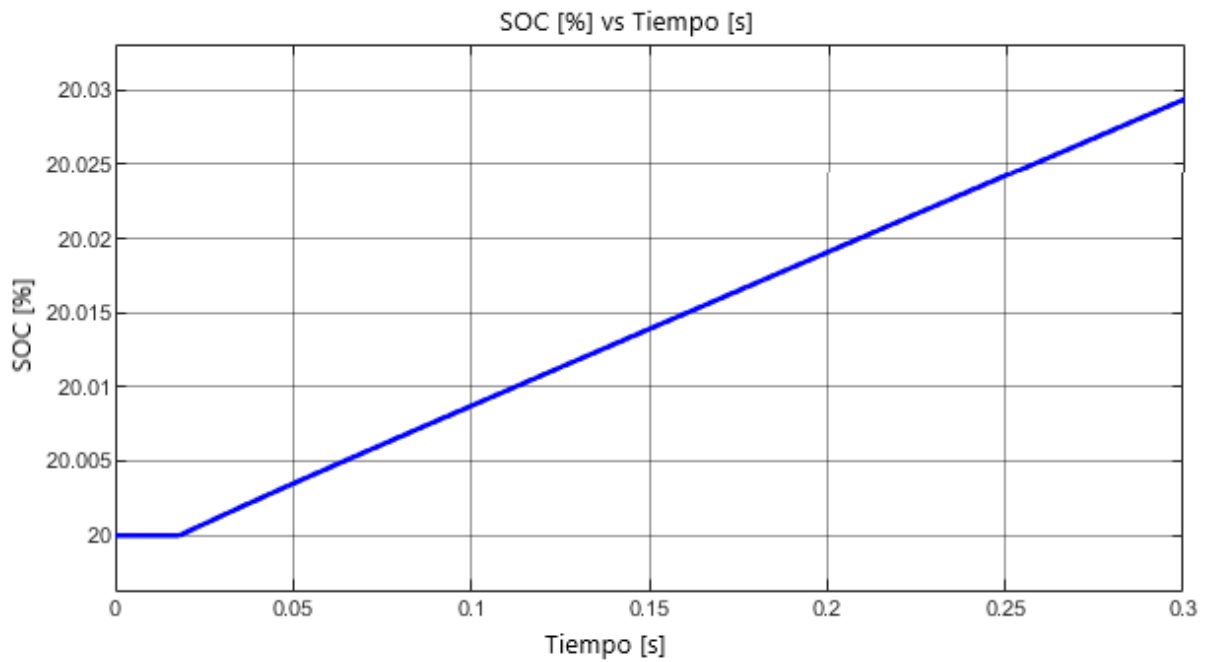


Figura 37. Estado de carga de la batería en el modo 1.2 (Topología 1).

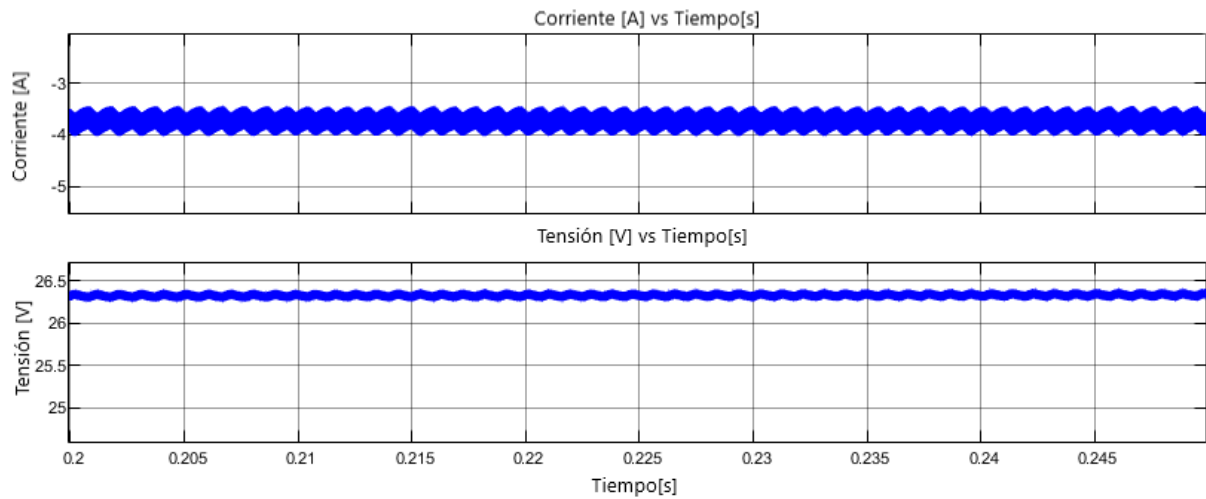
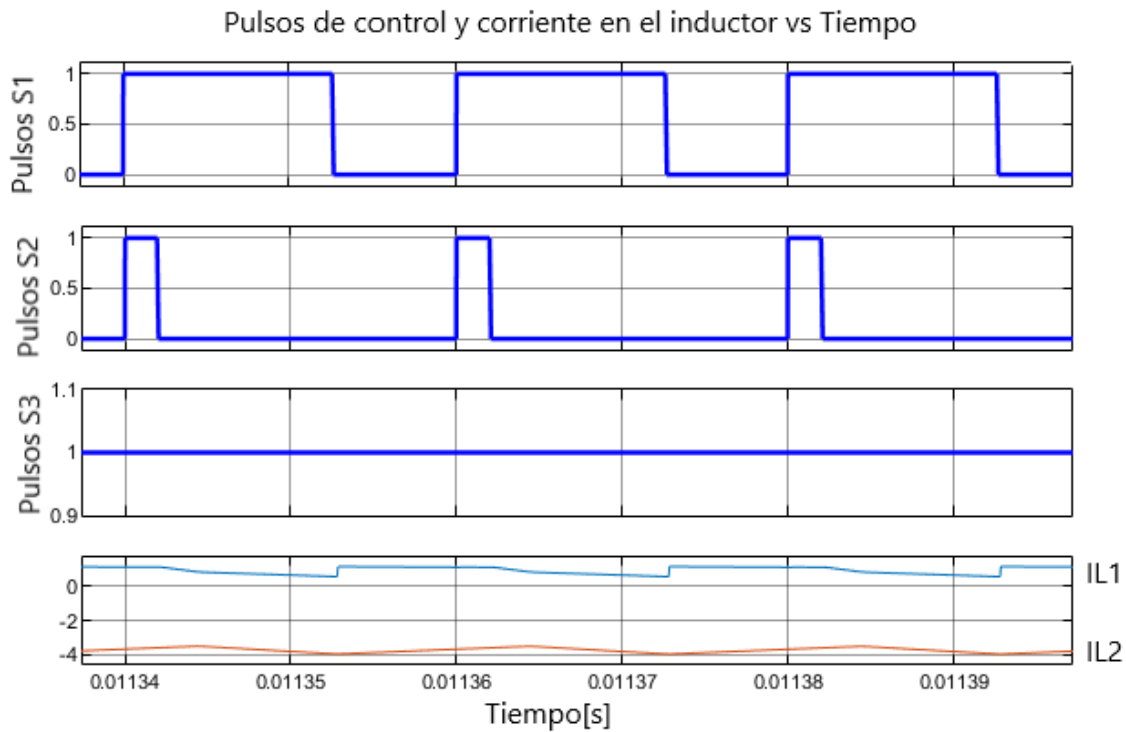


Figura 38. Tensión y corriente de la batería en el modo 1.2 (Topología 1).

Los pulsos obtenidos a la salida del selector de modos son los observados en la figura 39, en esta se puede observar que el interruptor correspondiente al controlador MMPT ( $S_1$ ) ha

empezado a conmutar, permitiendo el flujo de corriente hacia la batería y por consecuencia, cargándola.



*Figura 39.* Pulsos de control ( $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$ ) y corrientes en los inductores ( $I_{L1}$ ,  $I_{L2}$ ) para el modo 1.2 (Topología 1).

Como es de esperar, el regulador de tensión también debe estar operando y por ende la tensión en los terminales debe ser 100[V] y la potencia consumida 100[W].

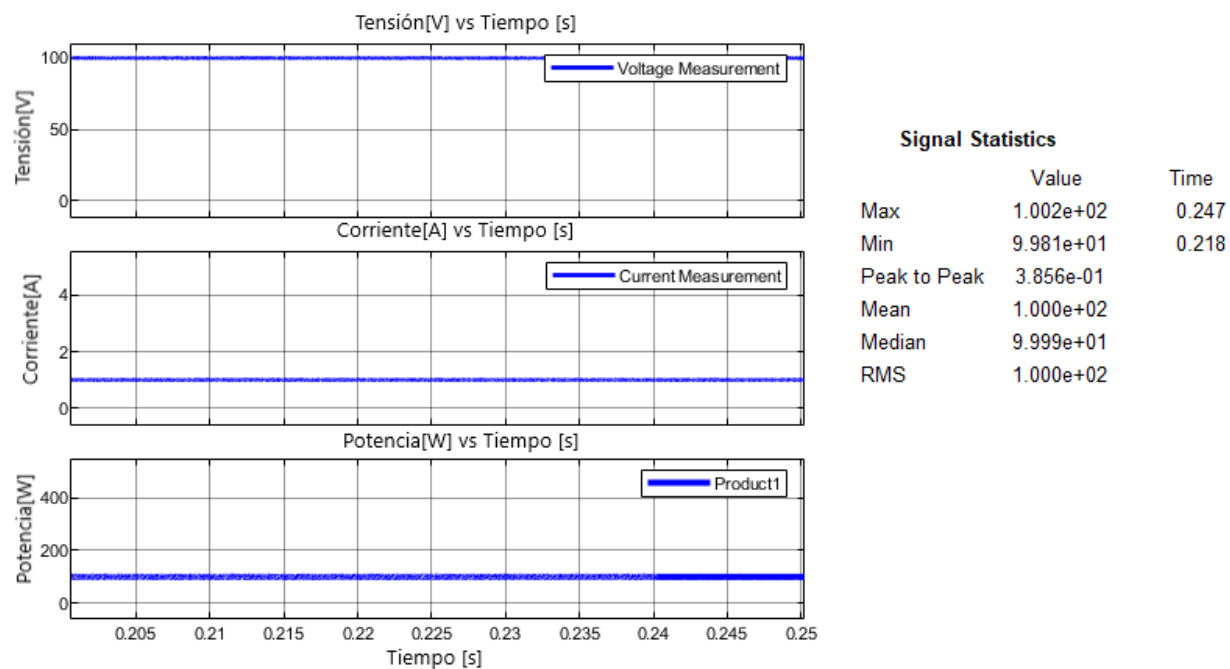


Figura 40. Tensión, corriente y potencia de salida para el modo 1.2 (Topología 1).

### Modo 2.1

En este modo, la carga absorbe una potencia mayor a la que puede ofrecer el panel fotovoltaico operando en su punto de máxima potencia, por ende es necesario que la batería aporte una potencia igual al déficit que genera la diferencia entre la potencia de entrada y la necesaria a la salida, sin embargo, debido a que el algoritmo de máxima potencia solo se encarga de controlar el interruptor que permite cargar la batería en este modo entra en funcionamiento el MinPPT, en la figura 41 se puede observar que el panel está operando en un punto diferente al de su máxima potencia, esto se debe a que la batería está entregando más potencia de lo que debería, no obstante, esta cantidad de potencia está siendo reducida de manera efectiva por el MinPPT que al conmutar  $S_3$  disminuye la cantidad de energía entregada por la batería para que la cantidad de potencia entregada por el panel, sea la máxima posible.

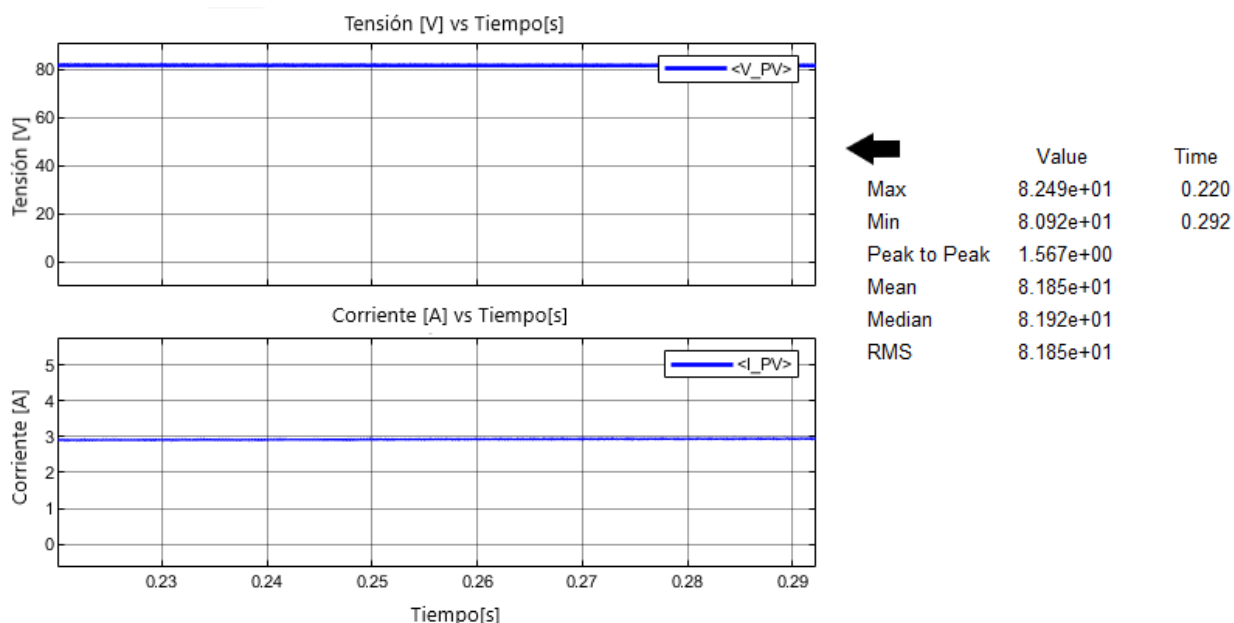


Figura 41. Tensión y corriente en el panel en el modo 2.1 (Topología 1).

Se puede apreciar en la figura 42 que la batería se está descargando, adicionalmente en la figura 43 se observa que la corriente es positiva, por ende, el flujo de potencia está en dirección a la carga.

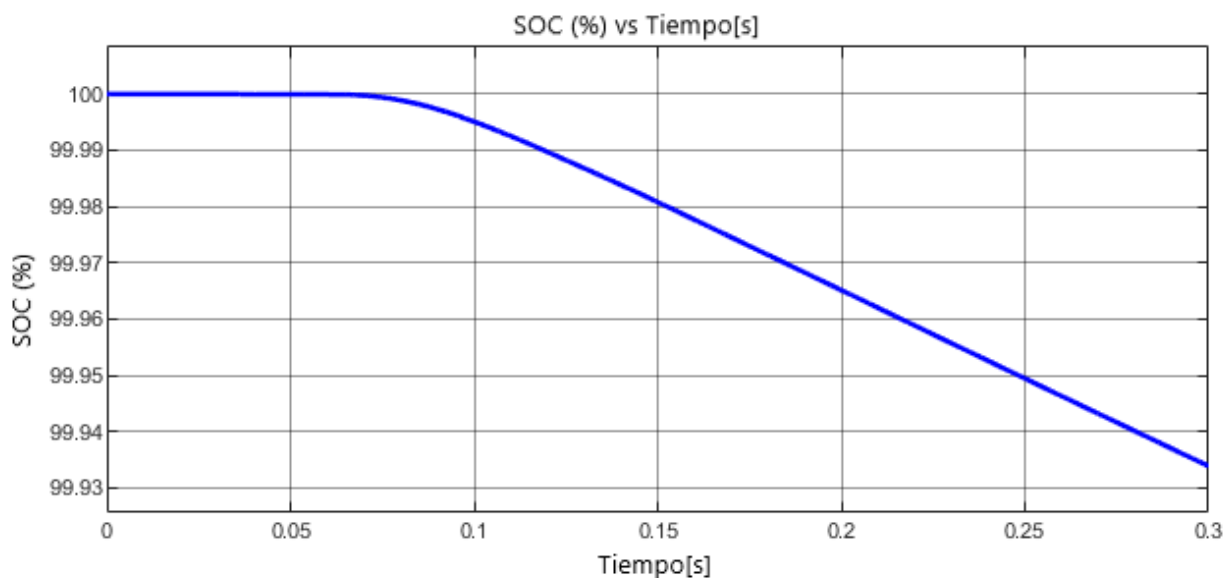


Figura 42. Estado de carga de la batería en el modo 2.1 (Topología 1).

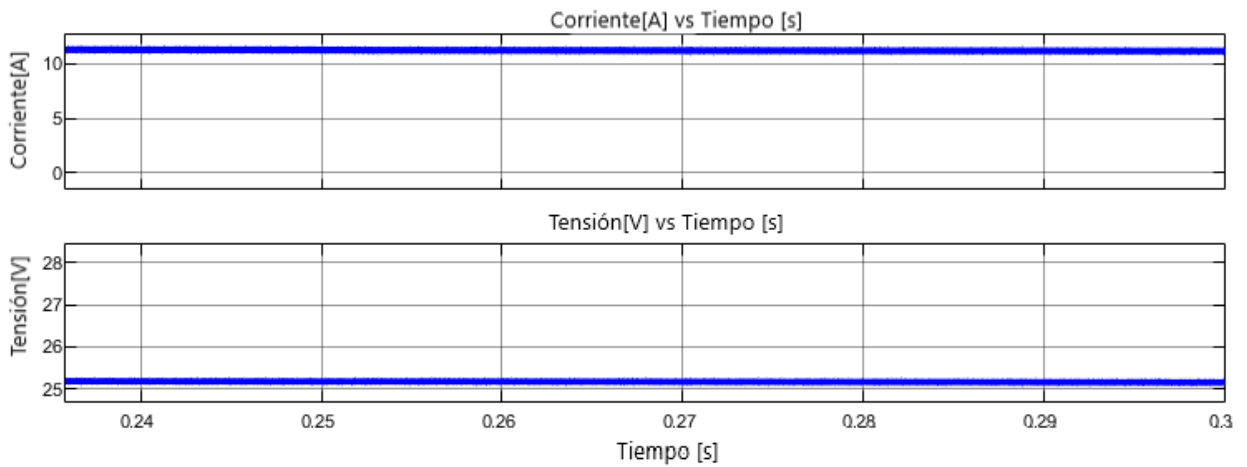


Figura 43. Tensión y corriente de la batería en el modo 2.1 (Topología 1).

El bloque selector de modos activa el regulador de tensión (OVR) y el MinPPT al detectar la demanda de potencia tal y como se puede ver en la figura 44.

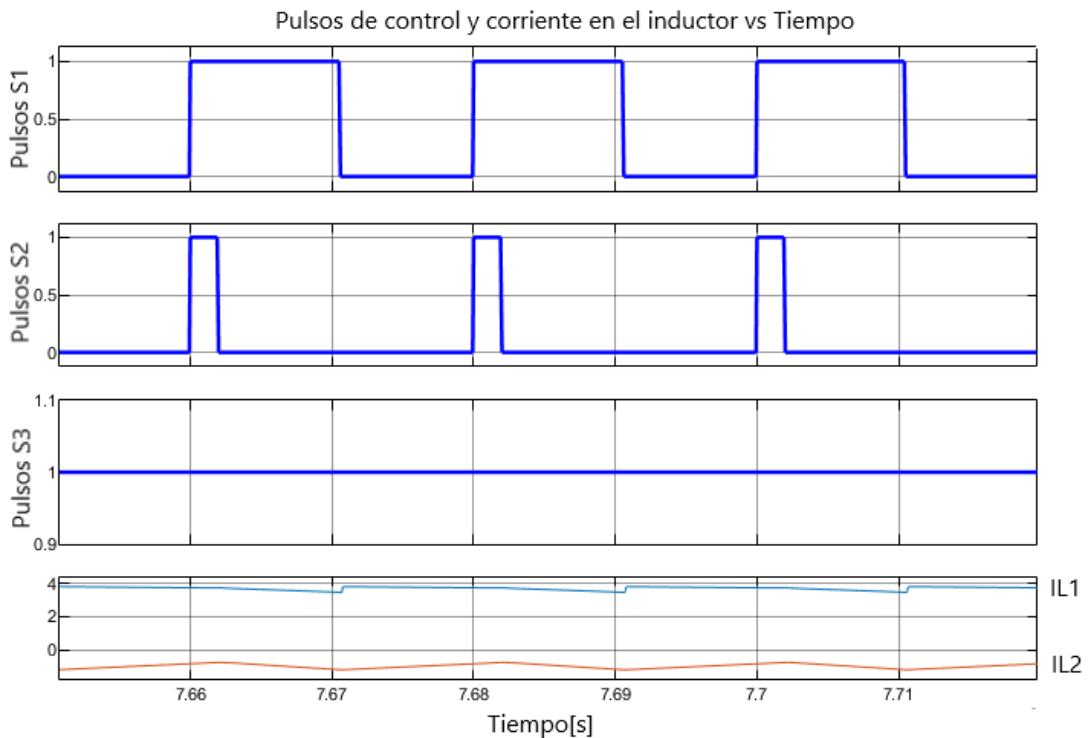


Figura 44. Pulsos de control ( $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$ ) y corrientes en los inductores ( $I_{L1}$ ,  $I_{L2}$ ) para el modo 2.1 (Topología 1).

En los terminales se puede observar que la potencia requerida por la carga ha aumentado a 500[W] (figura 45), excediendo la capacidad del panel fotovoltaico, sin embargo, la estrategia de control utilizada permite al sistema suplir esta carga y mantener la tensión de operación en los terminales.

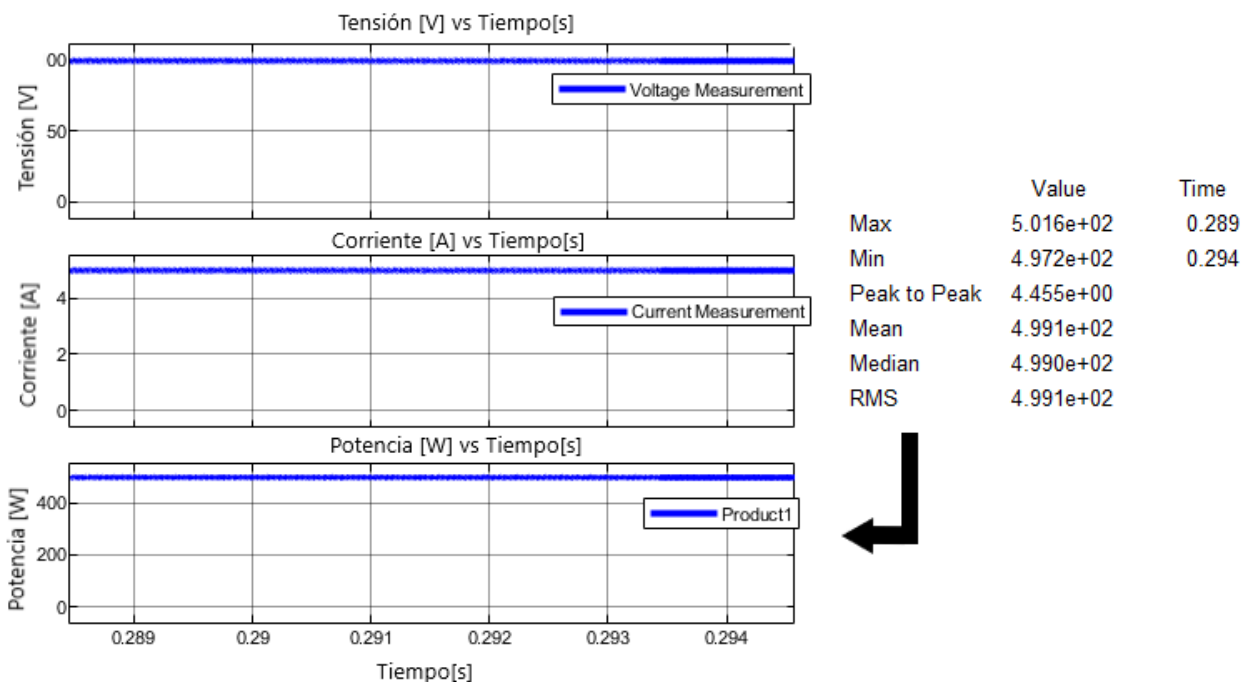


Figura 45. Tensión, corriente y potencia de salida para el modo 2.1 (Topología 1).

### Modo 2.2

En este modo, el panel fotovoltaico deja de entregar potencia al sistema, dejando a la batería como única alternativa para suplir la carga, como consecuencia, el bloque selector de modos activa el regulador de tensión de salida (OVR) y la batería comenzará a descargarse (Figura 46) y mostrar una corriente positiva (Figura 47) hasta alcanzar su SOCmin.

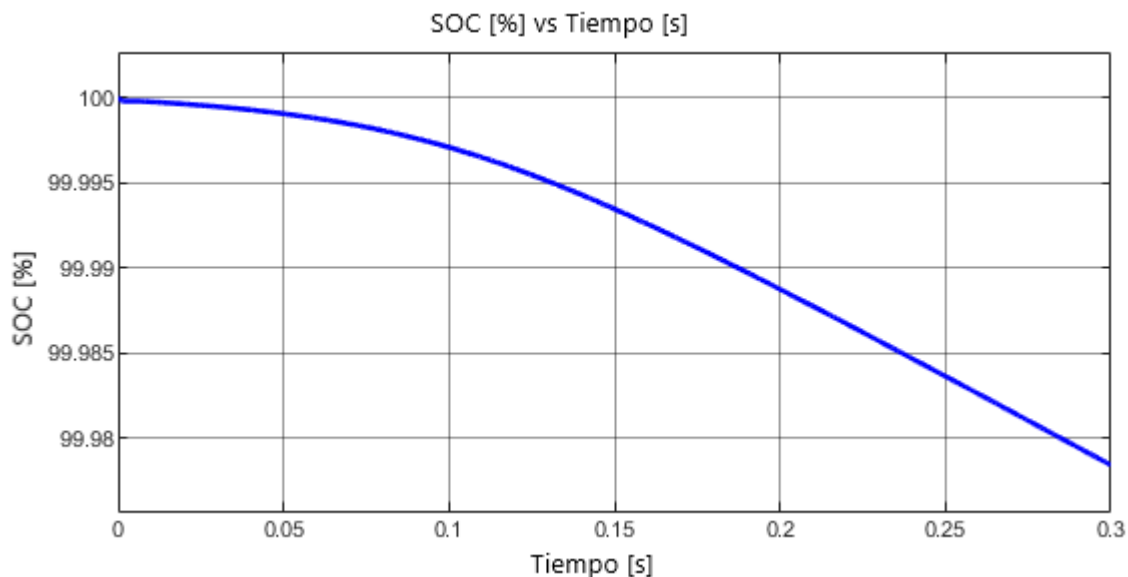


Figura 46. Estado de carga de la batería en el modo 2.2 (Topología 1).

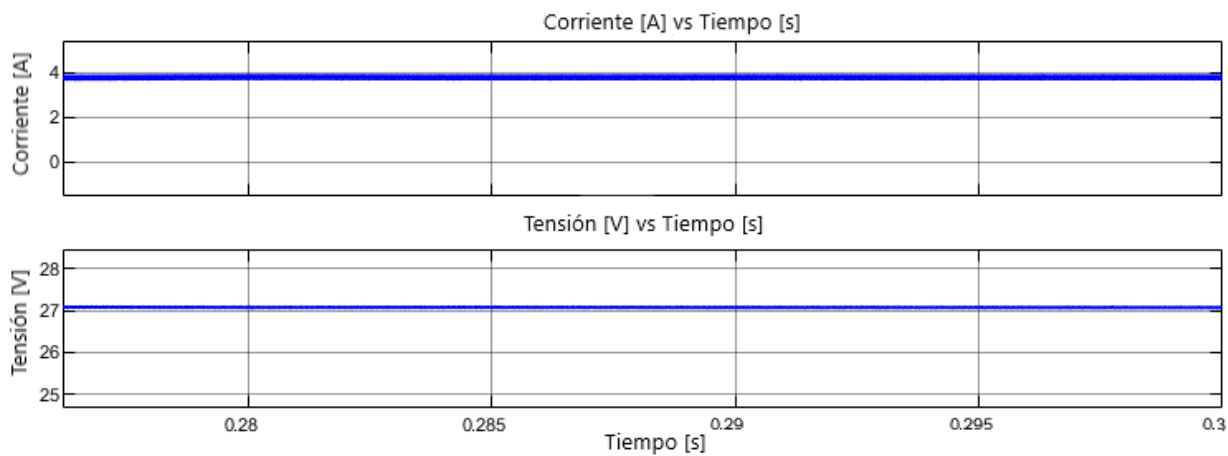
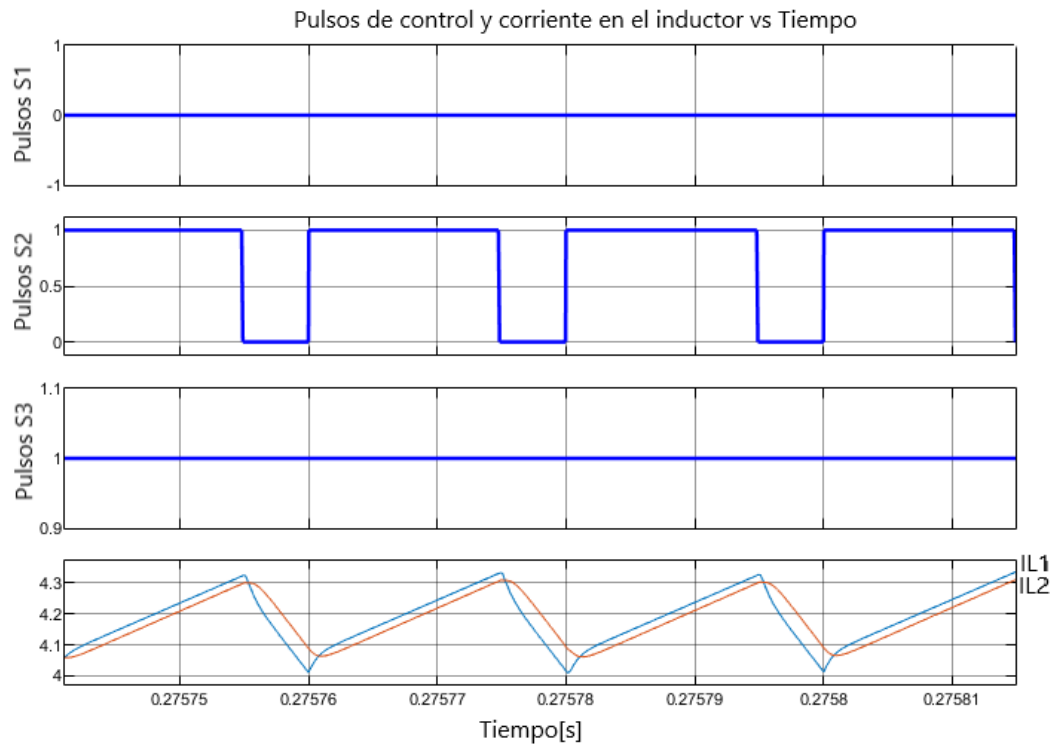


Figura 47. Tensión y corriente de la batería en el modo 2.2 (Topología 1).

Se observa en la figura 48 que los pulsos en la entrada son los mismos que los vistos en el modo 1.1, esto se debe a que el flujo de potencia va en la misma dirección y por el mismo camino, siendo ambos un modo de funcionamiento SISO donde la entrada es la batería y la salida es la carga.



*Figura 48.* Pulsos de control ( $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$ ) y corrientes en los inductores ( $I_{L1}$ ,  $I_{L2}$ ) para el modo 2.2 (Topología 1).

Se puede ver que el regulador de tensión (OVR) funciona de manera eficiente para todos los modos de funcionamiento en los que es requerido, validando el cálculo de las constantes PI del controlador.

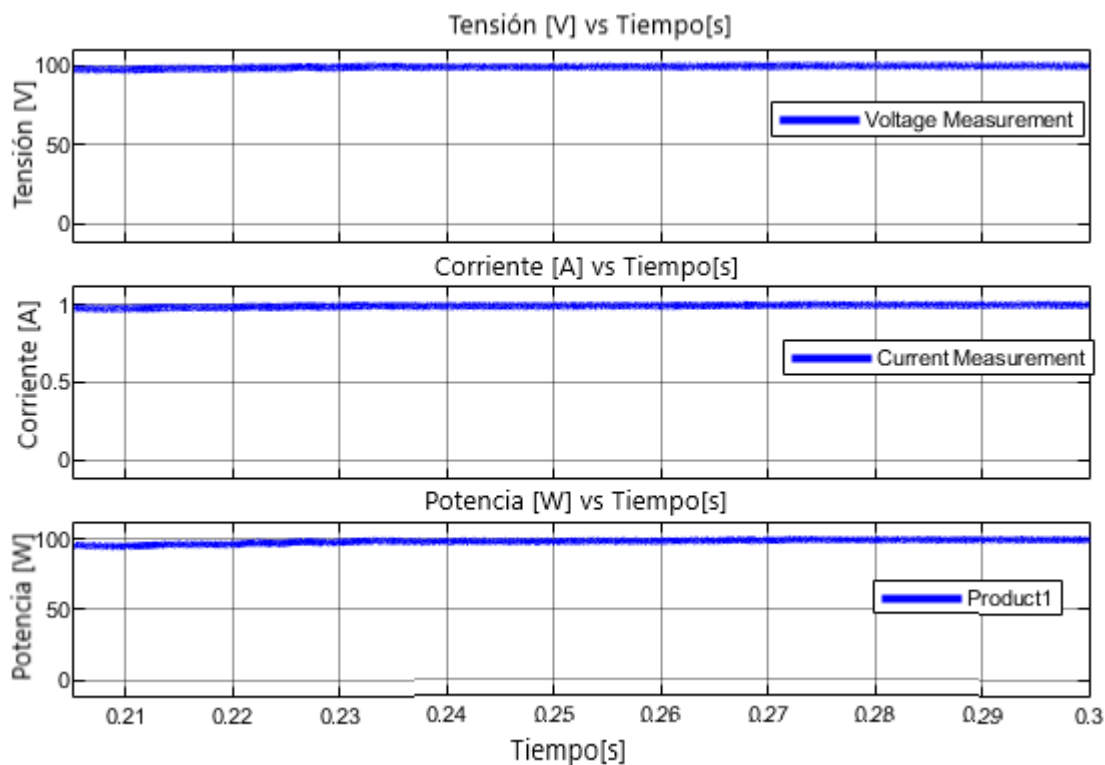


Figura 49. Tensión, corriente y potencia de salida para el modo 2.2 (Topología 1).

### Modo 3.1

En este modo no hay demanda de potencia desde la carga, debido a esto, la potencia que genere el panel será dirigida (de ser necesario) a la batería.

Se observa que el estado de carga (SOC) de la batería comienza a elevarse (figura 50), mostrando que esta se encuentra cargando, a su vez se puede ver en la figura 51 que la potencia entregada hacia la batería es de aproximadamente 150 [W].

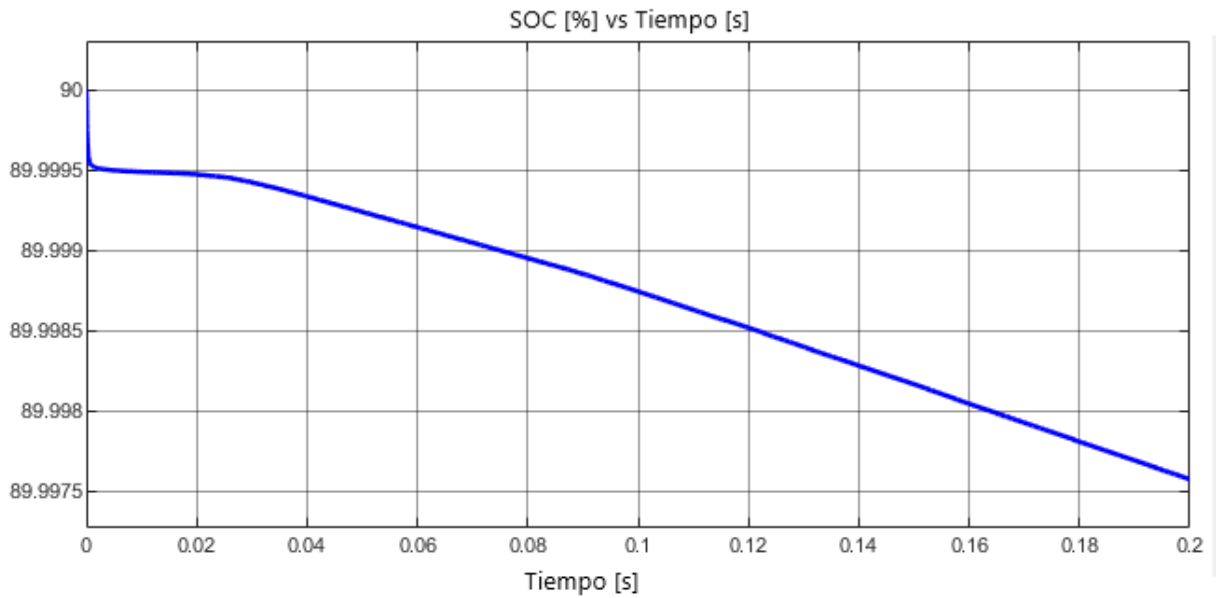


Figura 50. Estado de carga de la batería en el modo 3.1 (Topología 1).

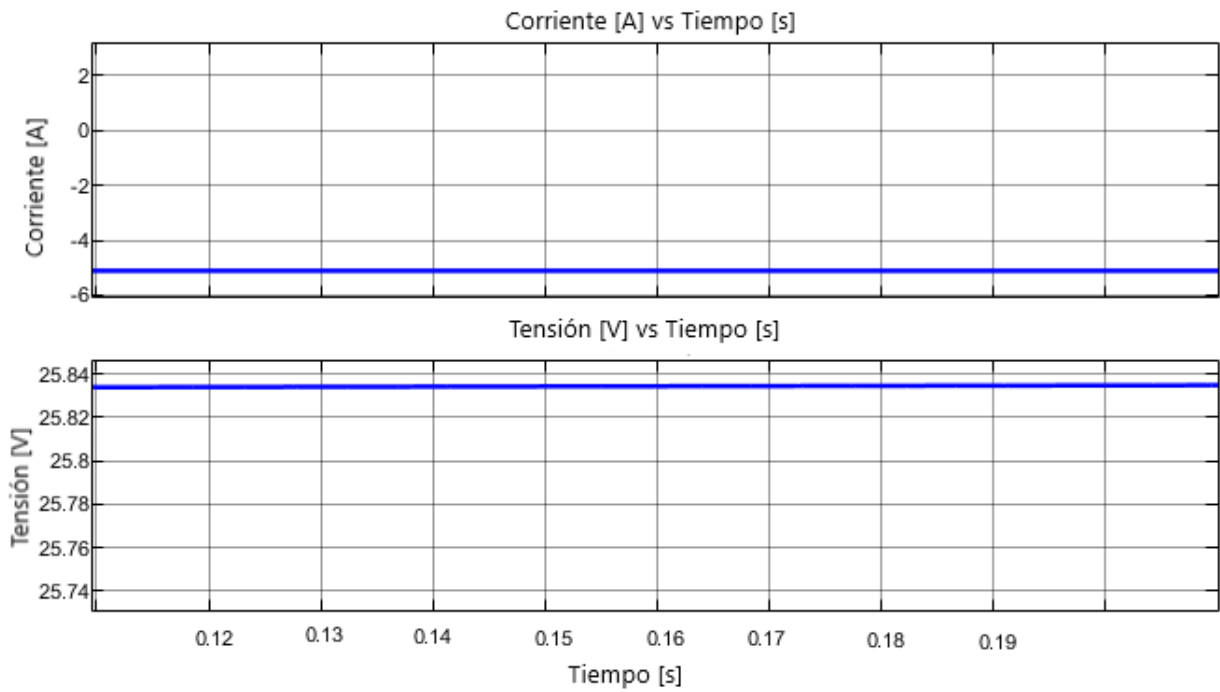


Figura 51. Tensión y corriente de la batería en el modo 3.1 (Topología 1).

Como se puede observar en la figura 52, ninguno de los controladores se encuentra activo en este modo, esto debido a que la potencia entregada por el panel está determinada con la tensión de la batería y esta solo permite alcanzar los 24 [V].

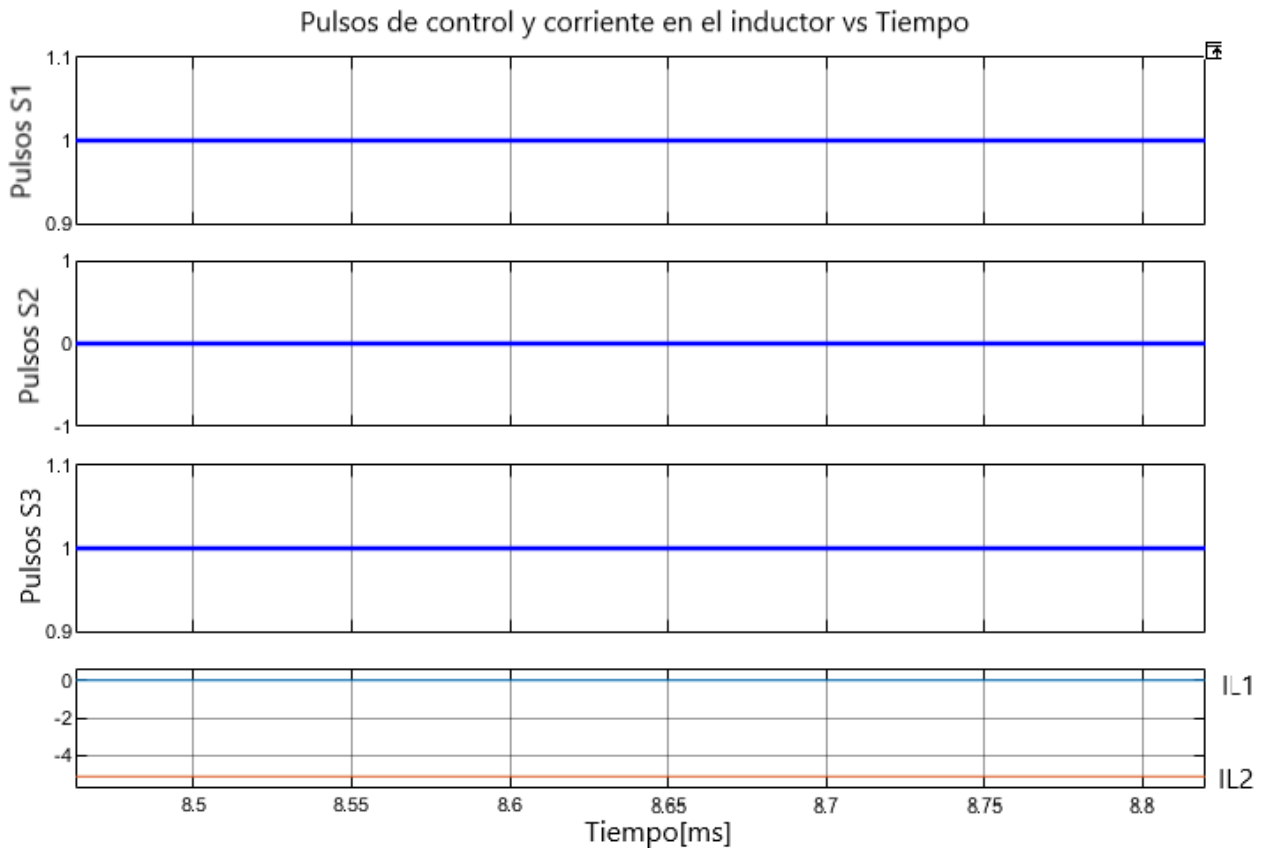


Figura 52. Pulsos de control ( $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$ ) y corrientes en los inductores ( $I_{L1}$ ,  $I_{L2}$ ) para el modo 3.1 (Topología 1).

#### Análisis de conmutación entre modos

A continuación, se mostrarán los resultados obtenidos durante la conmutación que ocurre entre los modos 2.1 y 2.2 (DO a SISO).

Para esta conmutación se añadió una perturbación al sistema a los 450 [ms], con el propósito de observar el comportamiento del control ante un cambio en las condiciones de operación y así

determinar si la conmutación tuvo lugar y cumple de manera rápida y eficaz ante las necesidades del sistema.

En la figura 53, se pueden observar los pulsos de control de los interruptores ( $S_1$ ,  $S_2$  y  $S_3$ ) antes y después de ser introducida la perturbación, el interruptor  $S_1$  antes y después de la perturbación no es afectado de ninguna manera, permaneciendo siempre inactivo al igual que el interruptor  $S_2$ , que siempre permanece conmutando, contrario a estos dos interruptores el interruptor  $S_3$  antes de la perturbación conmutaba y después el interruptor permaneció siempre activo, pudiendo inferir que el flujo de potencia en la batería ha cambiado.

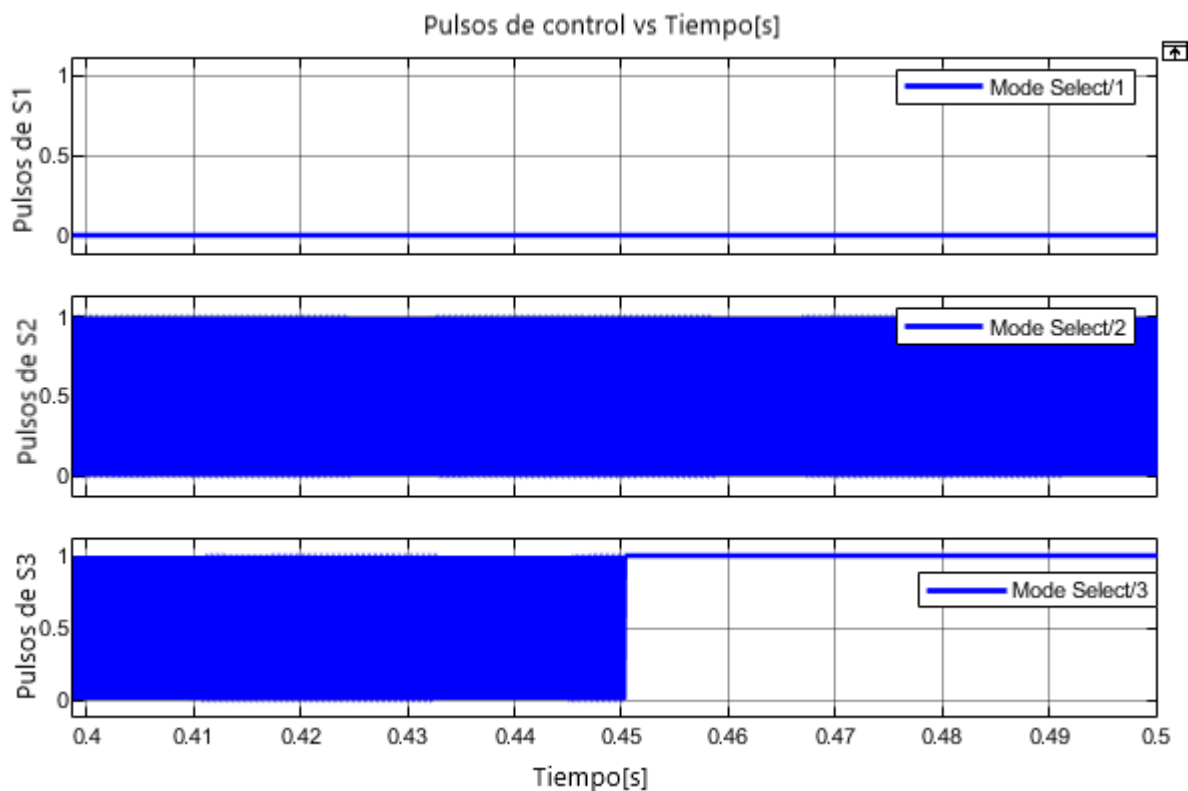


Figura 53. Puntos de control de conmutación entre modo 2.1 a modo 2.2 (DO a SISO).

En la figura 54 se evidencia que ante la perturbación introducida la tensión, corriente y potencias son mínimamente afectadas, manteniendo una tensión de salida de 100 V con una potencia de salida de 400W, evidenciando la efectividad de la estrategia de control utilizada.

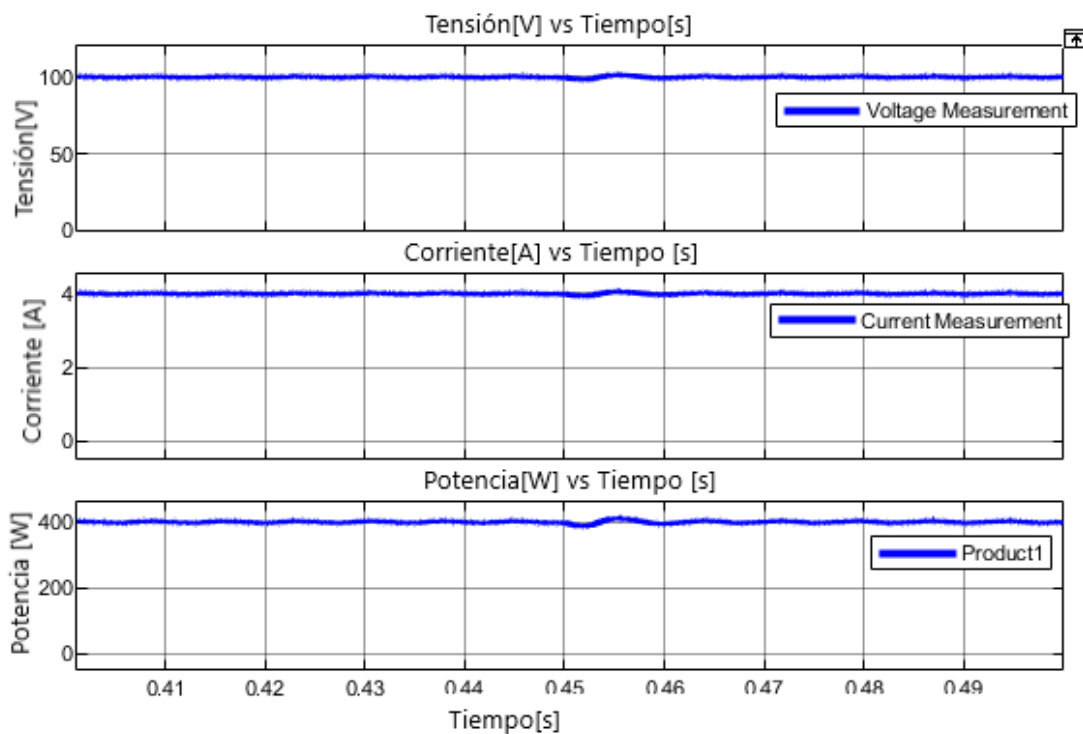


Figura 54. Tensión, corriente y potencia de salida en la conmutación entre modo 2.1 a modo 2.2 (DO a SISO).

En el momento de analizar la perturbación de la señal de salida del generador fotovoltaico, (ver figura 55) se puede observar que la tensión disminuye aproximadamente un 25% de su tensión inicial, la corriente deja de fluir, esto ocurre en situaciones donde la fuente fotovoltaica deja de contar con la radiación solar necesaria para la generación de energía o un daño en la misma.

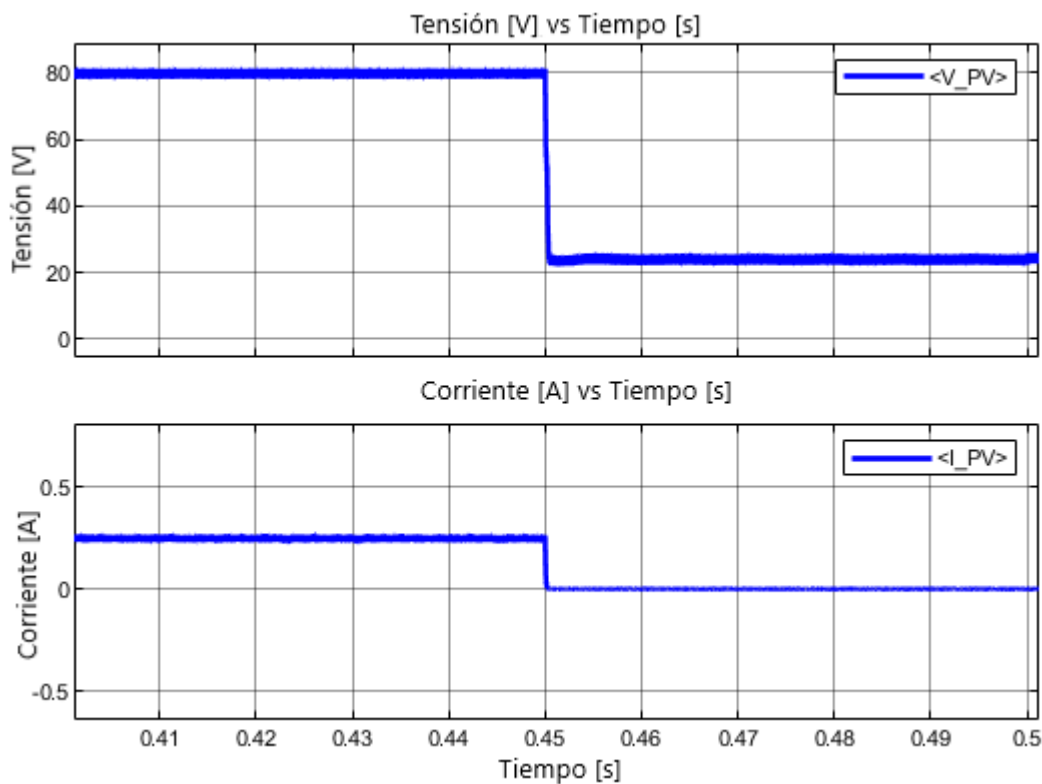


Figura 55. Tensión y corriente en el panel en la conmutación entre modo 2.1 a modo 2.2 (DO a SIS0).

#### Análisis de resultados topología 2

##### Modo DO

Este modo se da cuando el panel fotovoltaico cuenta con la suficiente potencia para suplir la demanda de la carga sin llegar a su punto de máxima potencia, el panel fotovoltaico entrega potencia a la carga y a la batería mediante la incorporación de un MPPT P&O que se encarga de hacer que el panel entregue toda la potencia que le sea posible generar, llevando su tensión a valores cercanos a su MPPT tal y como se puede apreciar en la figura 56.

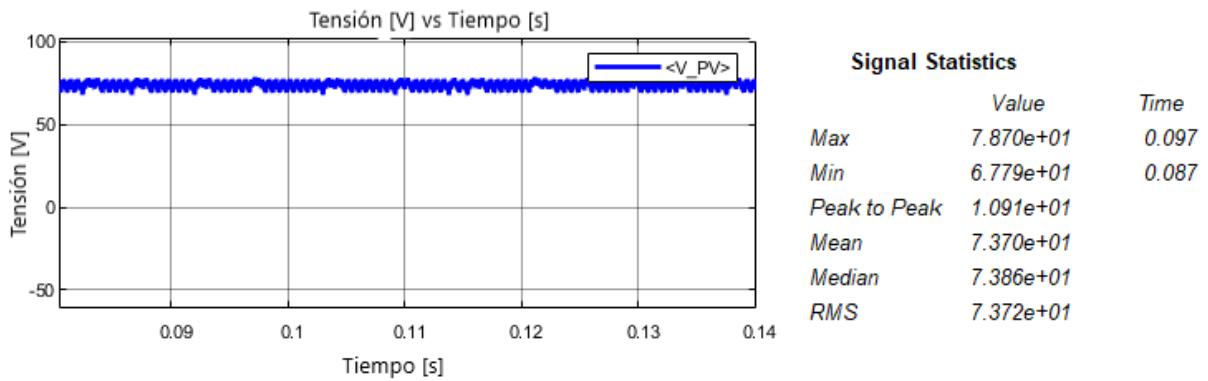


Figura 56. Tensión en el panel en el modo DO (Topología 2).

Al igual que la topología anterior, se puede observar que en este modo la batería se carga (figura 57) de manera satisfactoria en función de la potencia que se tenga disponible, también se observa en la figura 58 que la corriente es negativa, indicando que la batería está absorbiendo potencia.

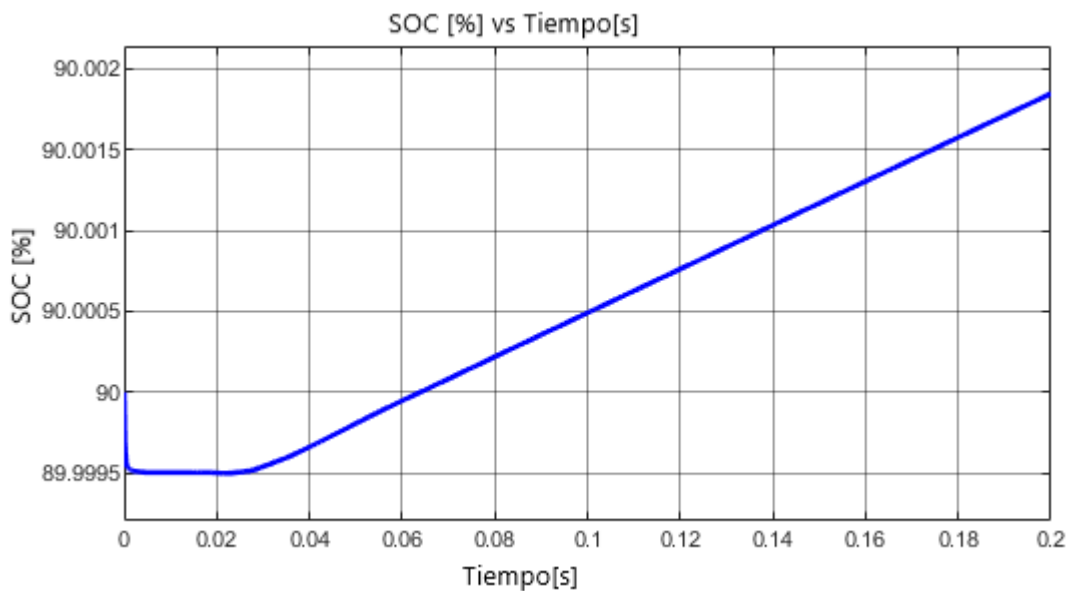


Figura 57. Estado de carga de la batería en el modo DO (Topología 2).

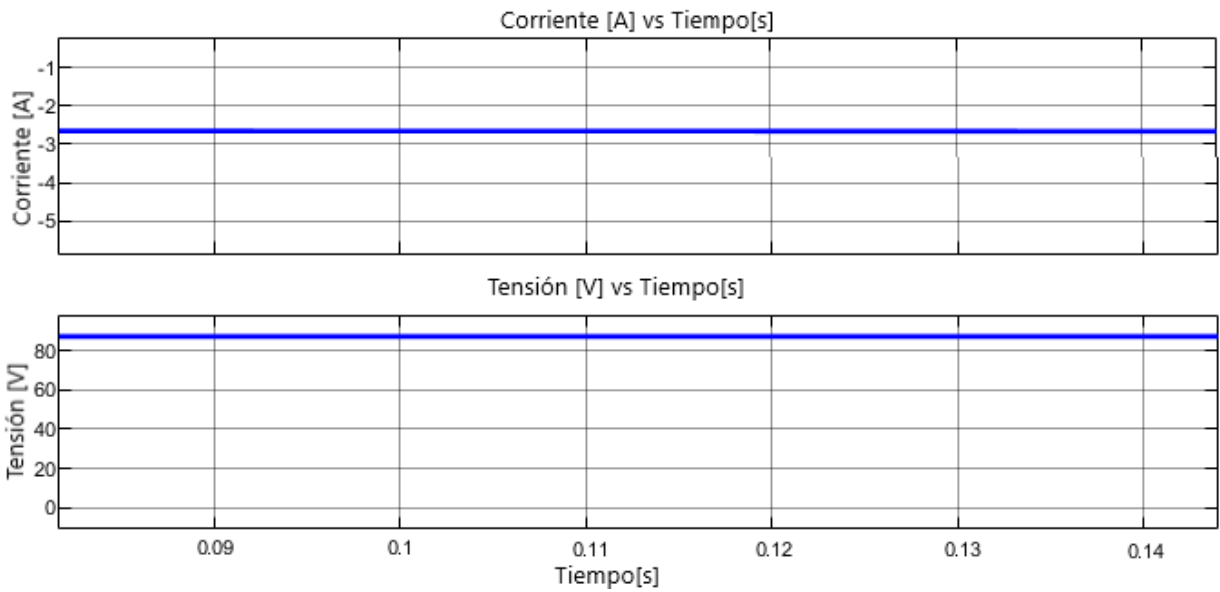


Figura 58. Tensión y corriente de la batería en el modo DO (Topología 2).

Los pulsos generados por el control corresponden a los interruptores encargados de regular la tensión de salida, la corriente y tensión de carga (BCR & BVR).

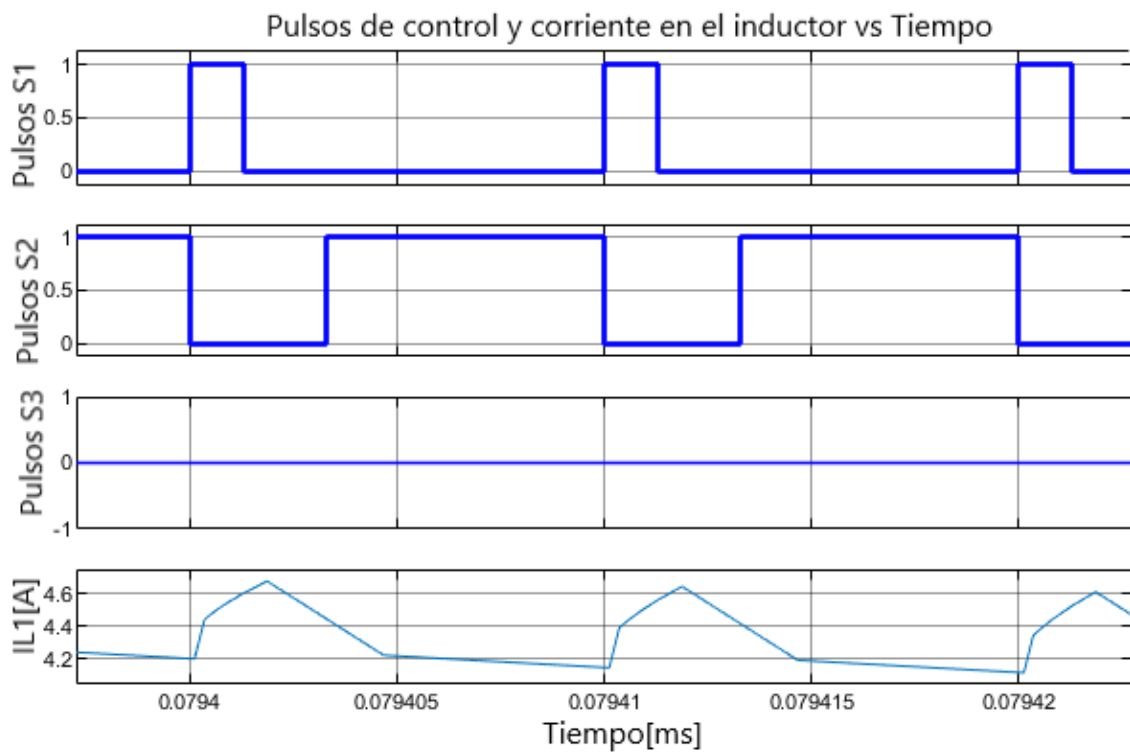


Figura 59. Pulsos de control ( $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$ ) y corriente en el inductor ( $I_L$ ) para el modo DO (Topología 2).

De la misma forma, el regulador de tensión (OVR) cumple su propósito, entregando a la salida los valores de tensión para los que se diseñó el convertidor.

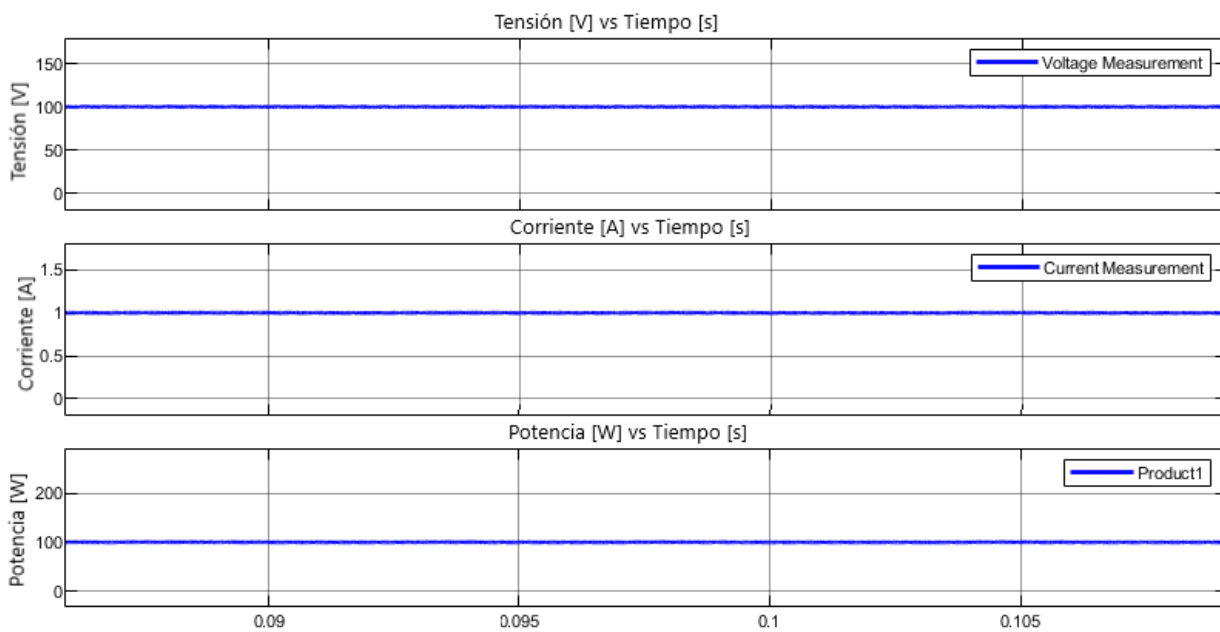


Figura 60. Tensión, corriente y potencia de salida para el modo DO (Topología 2).

*Modo DI*

En este modo, la potencia requerida por la carga excede las capacidades del panel fotovoltaico, siendo necesaria la batería para suplir la demanda, se puede observar en la figura 61 que el MPPT se ha encargado de llevar el panel a su punto de máxima potencia.

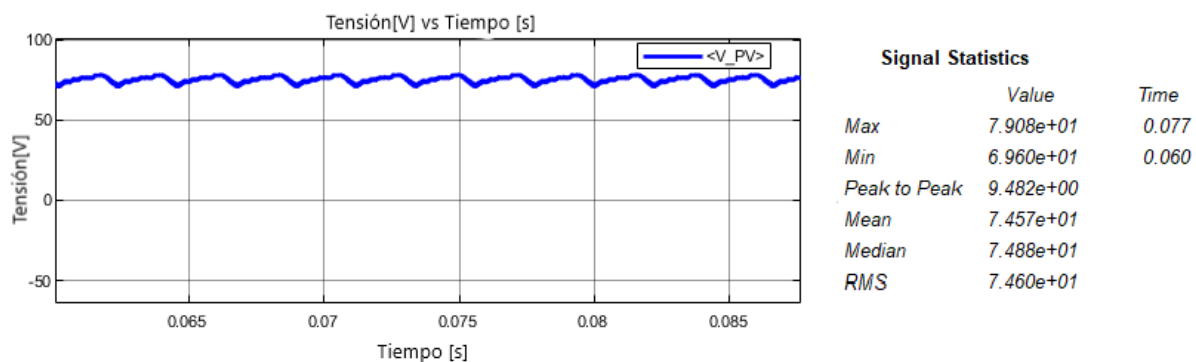


Figura 61. Tensión en el panel en el modo DI (Topología 2)

La batería comienza a descargarse como se muestra en la figura 62 y la corriente positiva denota que el flujo de potencia fluye hacia afuera de la batería.

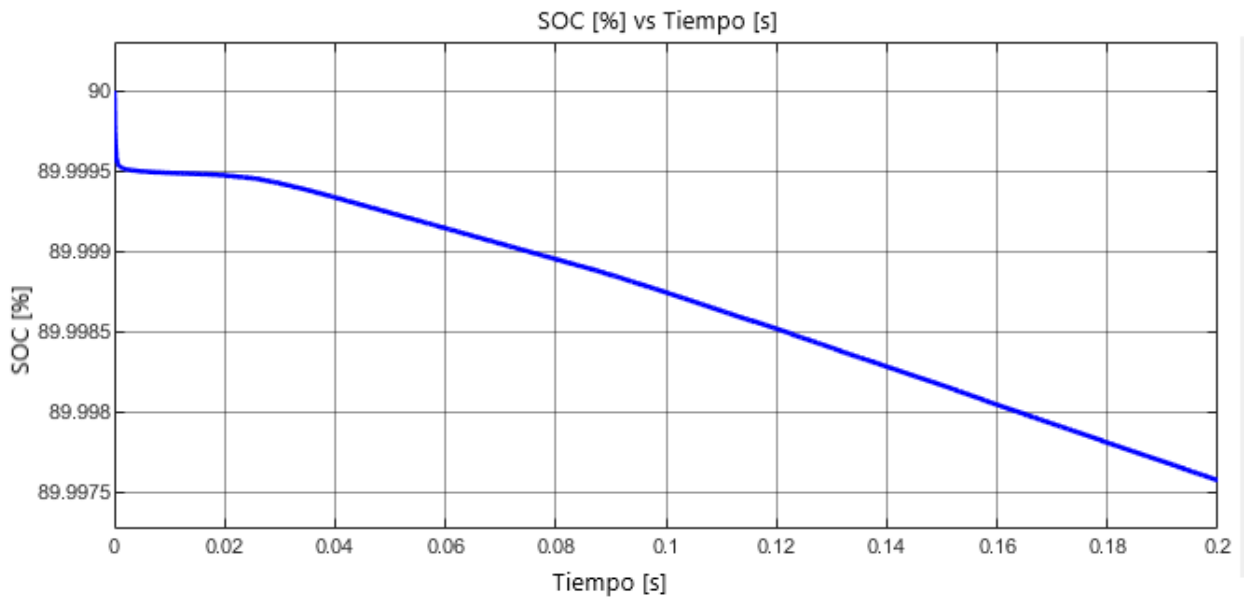


Figura 62. Estado de carga de la batería en el modo DI (Topología 2).

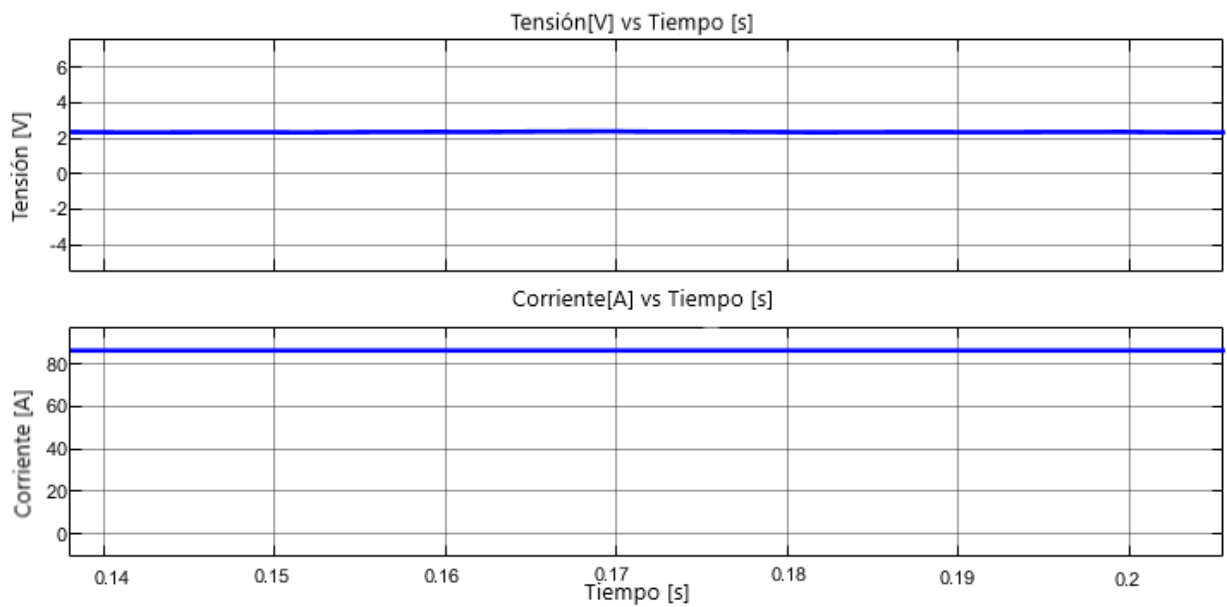


Figura 63. Tensión y corriente de la batería en el modo DI (Topología 2).

Los pulsos obtenidos en la figura 64 muestran que son los interruptores encargados de entregar potencia a los que están conmutando, validando el funcionamiento del esquema propuesto para llevar a cabo el control de los mismos.

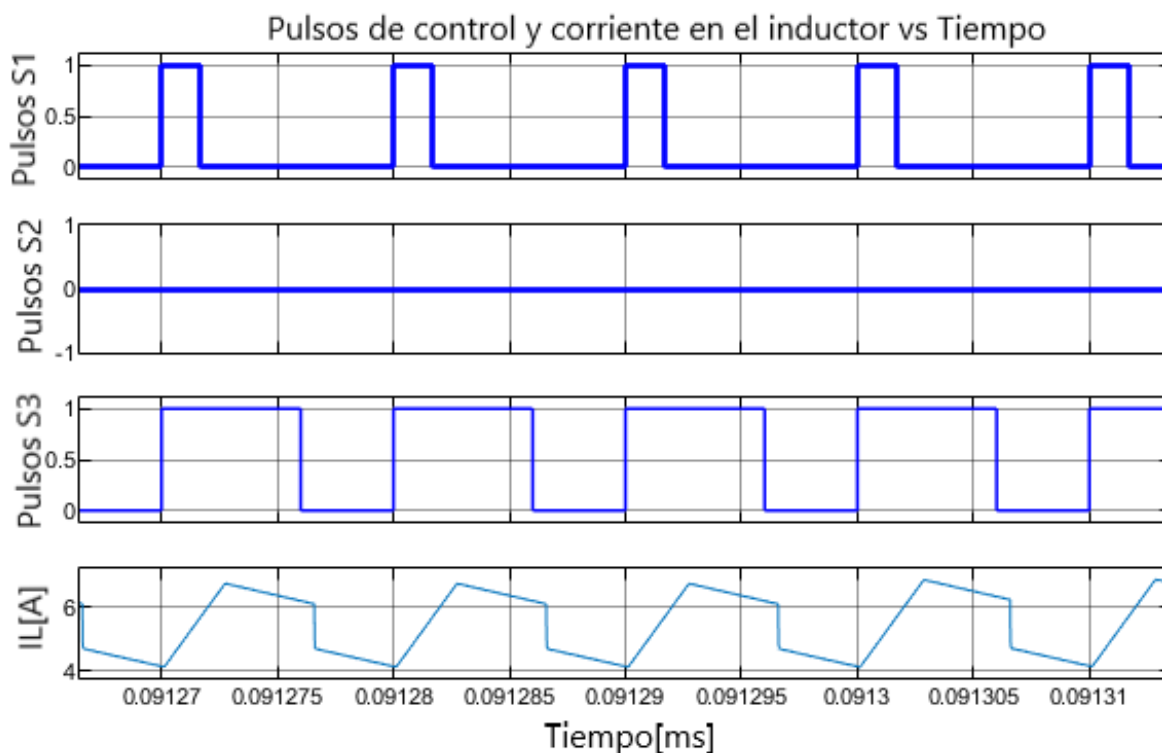


Figura 64. Pulsos de control ( $S1$ ,  $S2$ ,  $S3$ ) y corriente en el inductor ( $I_L$ ) para el modo DI (Topología 2).

Pese a la nueva demanda de potencia (500 [W]) el OVR puede mantener satisfactoriamente la tensión en terminales de manera eficiente, esto valida los cálculos hechos para la obtención de las variables PI del controlador implementado.

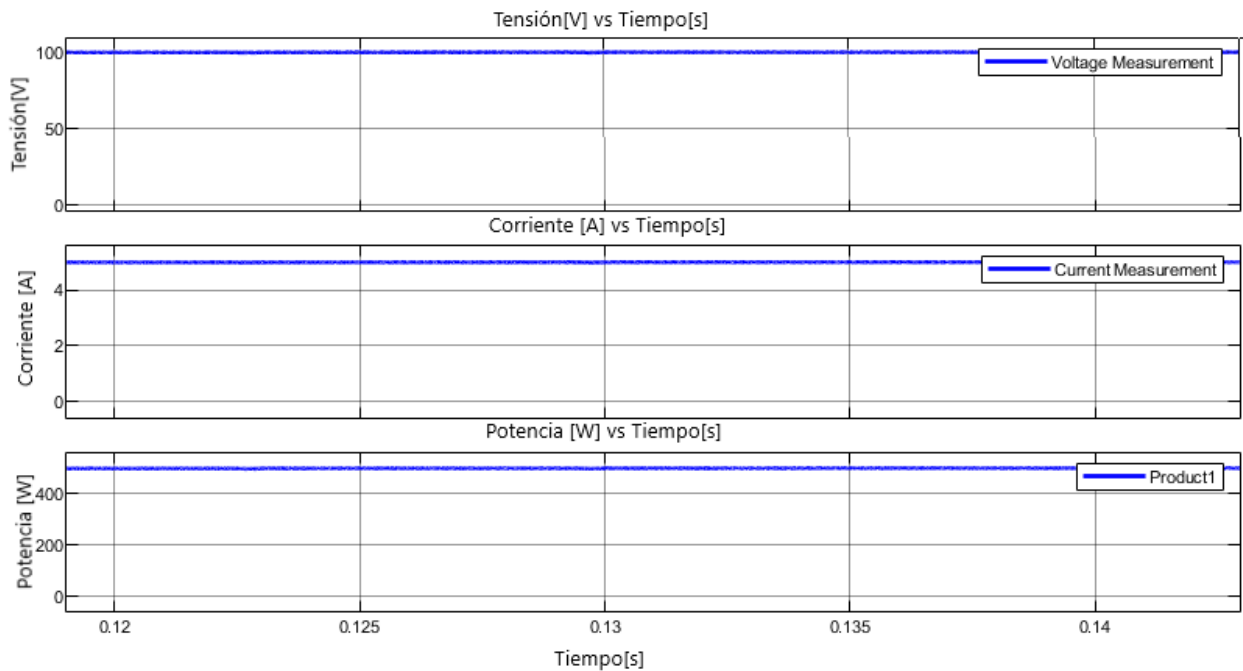


Figura 65. Tensión, corriente y potencia de salida para el modo DI (Topología 2).

*Modo SISO*

En este modo, la batería es la única con potencia disponible, por esto se puede apreciar en la figura 66 que esta se comienza a descargar al momento en que la carga comienza a requerir potencia y la corriente positiva mostrada en la figura 67 muestra que el flujo de potencia en la batería se dirige hacia afuera.

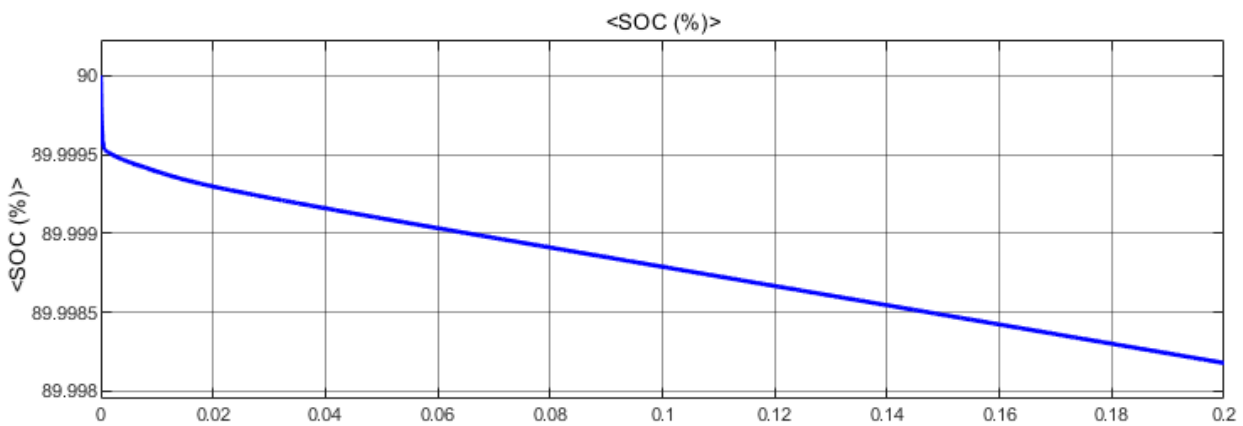


Figura 66. Estado de carga de la batería en el modo SISO (Topología 2).

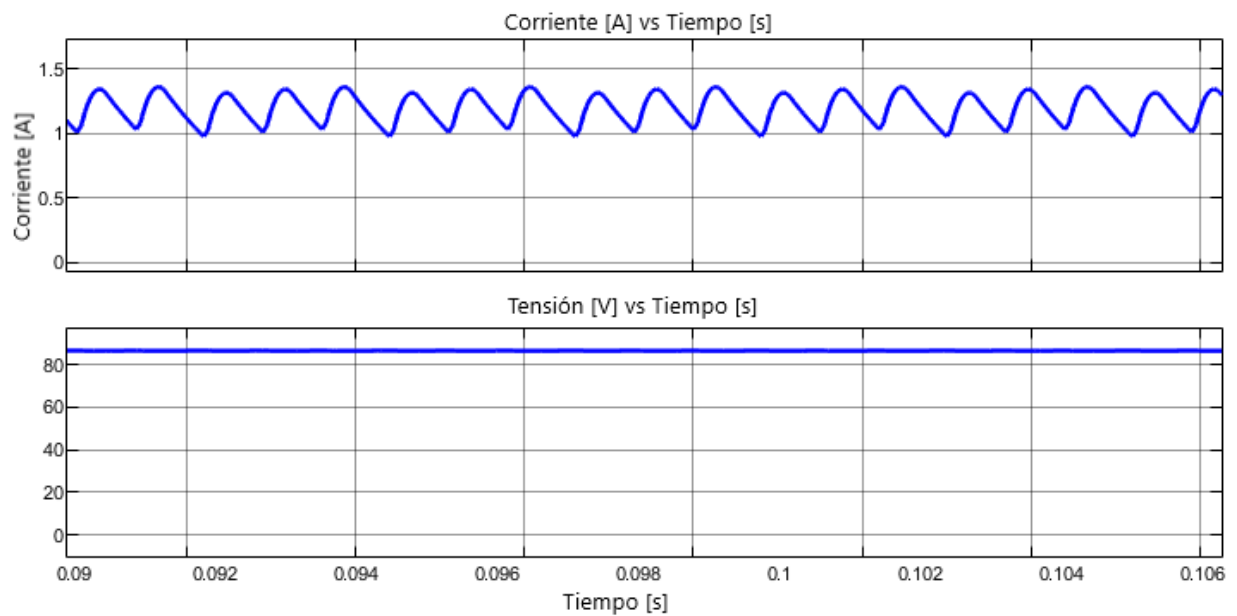


Figura 67. Tensión y corriente de la batería en el modo SISO (Topología 2).

Al observar los pulsos obtenidos a la salida del controlador (figura 68) se observa que solo el interruptor encargado de recibir la acción de control del OVR está conmutando, esto debido a que la potencia solo es entregada y absorbida por una sola fuente y una sola carga (modo SISO).

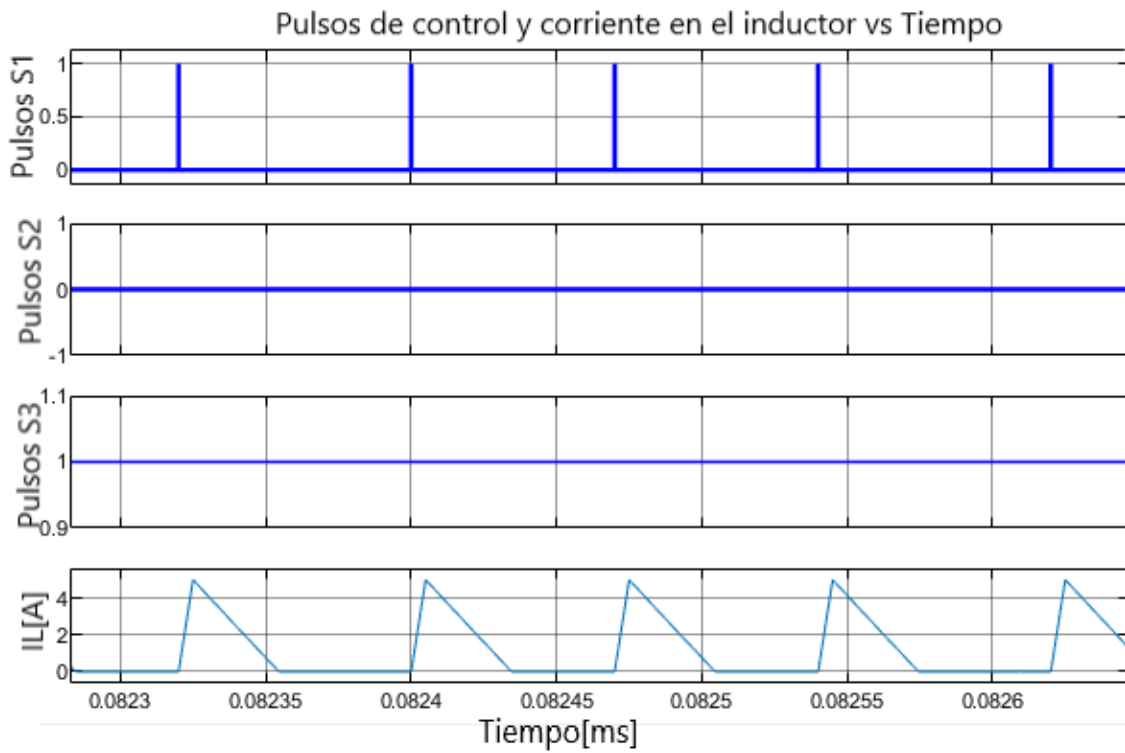


Figura 68. Pulsos de control ( $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$ ) y corriente en el inductor ( $I_L$ ) para el modo SISO (Topología 2).

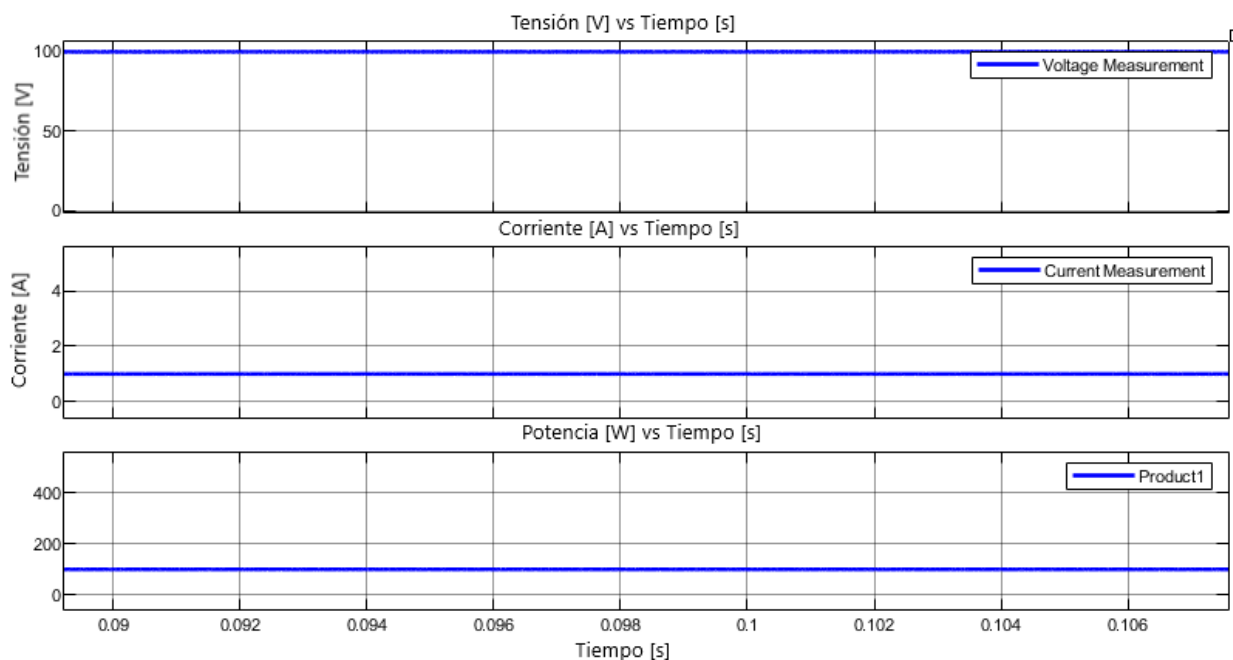


Figura 69. Tensión, corriente y potencia de salida para el modo SISO (Topología 2).

#### *Análisis de conmutación entre modos*

A continuación, se mostrarán los resultados obtenidos durante la conmutación que ocurre entre los modos DI y el modo SISO.

Para esta conmutación se añadió una perturbación al sistema a los 450 [ms], con el propósito de observar el comportamiento del control ante un cambio en las condiciones de operación y así determinar si la conmutación tuvo lugar y cumple de manera rápida y eficaz antes las necesidades del sistema.

En la figura 70, se pueden observar los pulsos de control de los interruptores ( $S_1$ ,  $S_2$  y  $S_3$ ) antes y después de ser introducida la perturbación, el interruptor  $S_1$  antes y después de la perturbación conmutando pero es afectado por la misma, necesitando un tiempo de establecimiento ligeramente más largo que la topología 1, el interruptor  $S_2$  permaneciendo siempre inactivo, el interruptor  $S_3$  se antes de la perturbación conmutaba y después el interruptor permaneció siempre activo, al igual que el interruptor  $S_2$  se demora un poco en estabilizarse, de

lo anterior, se puede ver que el flujo de potencia en la batería cambia y el control de la misma pasa del interruptor  $S_3$  al interruptor  $S_2$  .

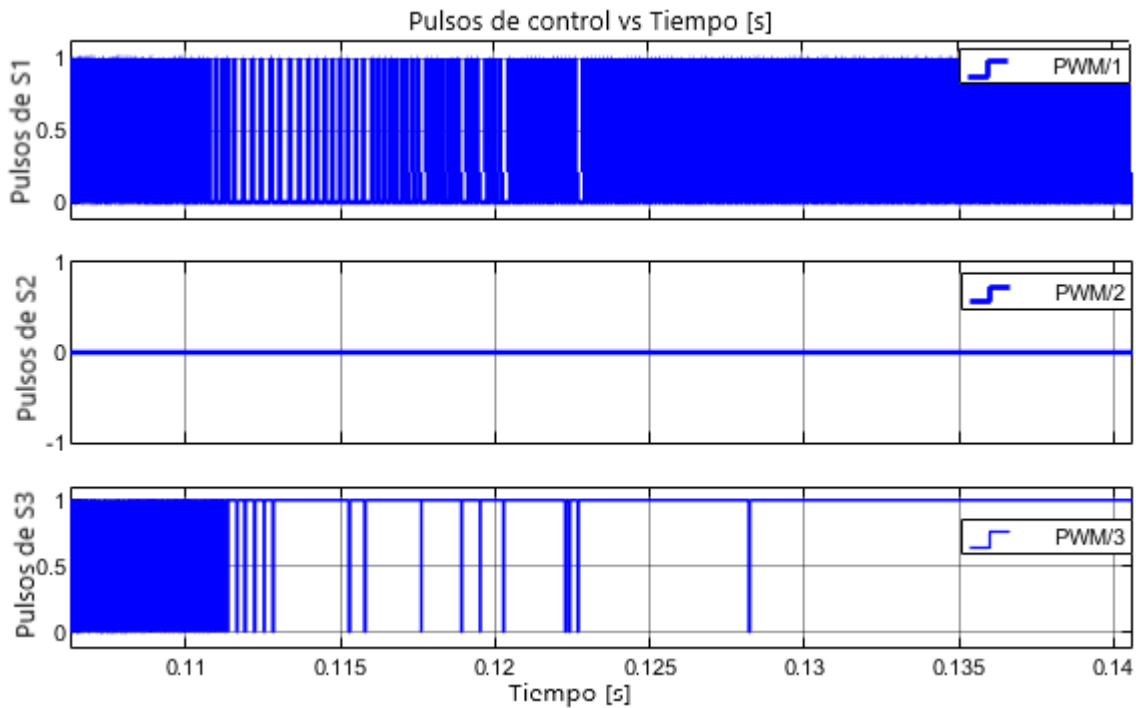


Figura 70. Puntos de control de conmutación entre modo DI y el modo SISO.

En la figura 71 se evidencia que ante la perturbación se ve afectada la tensión, corriente y potencia en pequeña medida, aunque, de una manera más evidente que la topología 1, aun así, se mantiene una tensión de salida de 100 [V] con una potencia de salida de 100[W], evidenciando la efectividad de la estrategia de control utilizada.

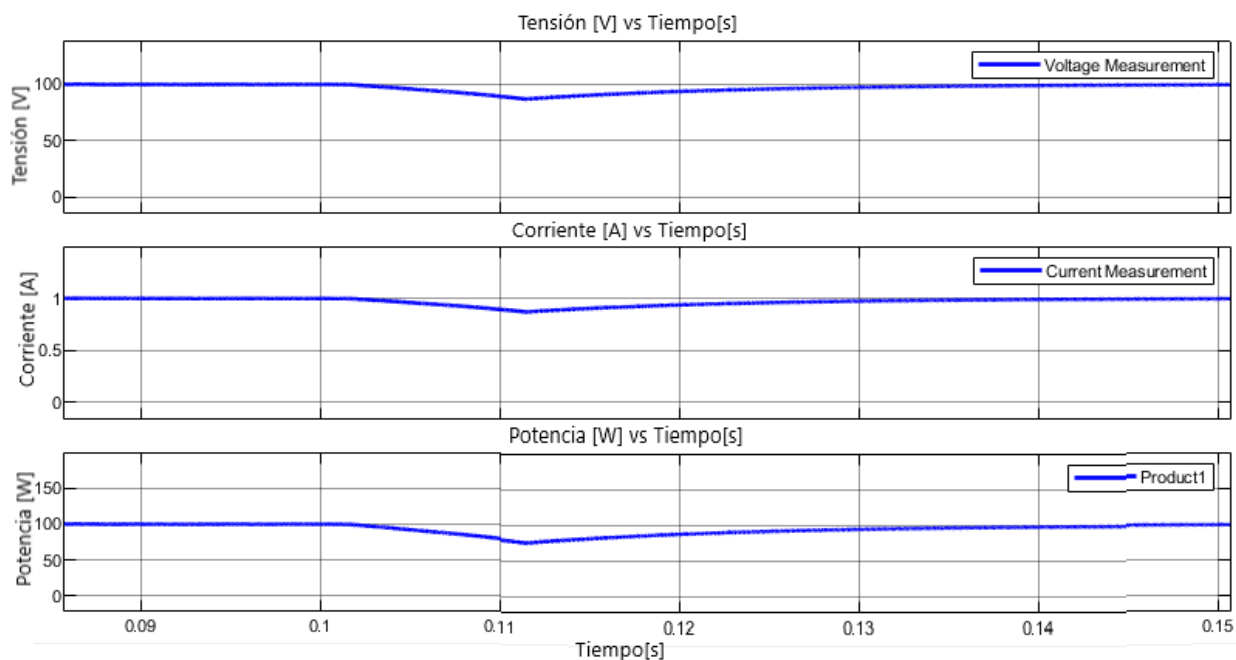


Figura 71. Tensión, corriente y potencia de salida en la conmutación entre modo DI y el modo SISO.

Analizando la perturbación de la señal de salida del generador fotovoltaico, (ver figura 72) se puede observar que la tensión disminuye y la corriente deja de fluir, del mismo modo que en la topología 1 se puede inferir que esto ocurre en situaciones donde la fuente fotovoltaica deja de contar con la radiación solar necesaria para la generación de energía o la ocurrencia de un daño en la misma.

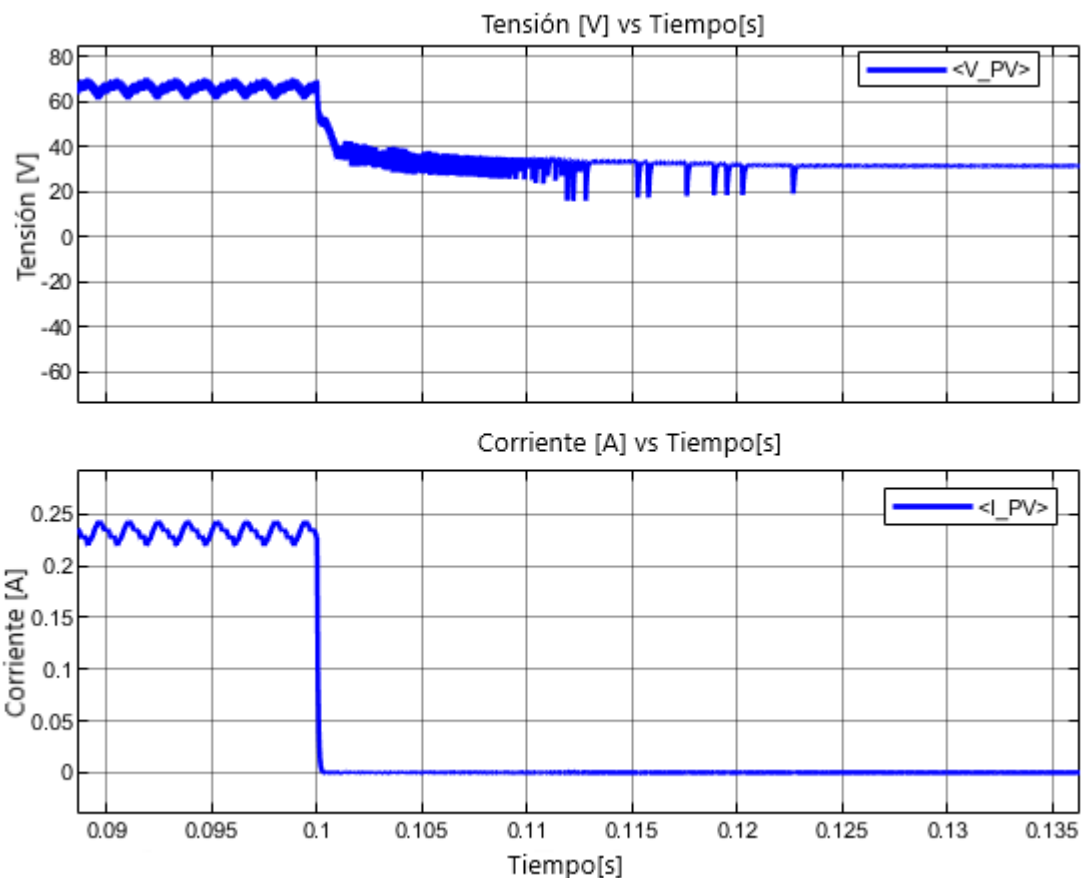


Figura 72. Tensión y corriente en el panel en la conmutación entre modo DI y el modo SISO.

### 5.1. Indicadores de desempeño

Los indicadores de desempeño que fueron seleccionados nos permitirán observar de mejor manera el funcionamiento de las dos topologías simuladas, condensando la información de estas en parámetros que permiten comparar ambas topologías de manera en que se pueda observar sus puntos positivos y negativos, los parámetros que se tuvieron en cuenta son los siguientes:

**Eficiencia:** permite cuantificar la potencia que se consume por los diferentes elementos que componen el convertidor.

**Tiempo de establecimiento entre modos:** permite ver la estabilidad que tiene el control ante perturbaciones en el sistema y su reacción a las mismas.

Tensión de salida: permite determinar si el convertidor es capaz de mantener un valor de tensión estable, necesaria para las diferentes cargas que se requieren alimentar.

Versatilidad: Permite entregar una valoración a la capacidad de adaptación que ofrece el control a las diferentes condiciones de funcionamiento a las que puede estar expuesta la instalación fotovoltaica.

Número de elementos: Esto nos dice mucho sobre el tamaño que puede llegar a tener el convertidor y su costo.

Complejidad del control: Parte importante en la implementación de sistemas fotovoltaicos de uso cotidiano es la complejidad que pueda tener la incorporación de un sistema de control que permita al sistema adaptarse a las condiciones de uso a las que será expuesto.

## 5.2. Comparación de indicadores de desempeño

Tabla 9.

*Comparación de indicadores de desempeño*

	Modo	Eficiencia (%)	Tiempo de establecimiento entre modos (seg)	Tensión de salida (V)	Versatilidad	Número de elementos	Complejidad del control
<b>Topología 1</b>	1.1	98.44	0.2	100	Alta	Inductor Capacitor Diodos Interruptor	2 1 3 3 Complejo
	1.2	97.86					
	2.1	95.62					
	2.2	97.88					
	3.1	91.70					
	3.2						
<b>Topología 2</b>	DO	94.57	0.11	100	Baja	Inductor Capacitor Diodos Interruptor	1 1 3 3 Simple
	DI	95.30					
	SISO	98.58					

Se puede ver en la tabla 9 que la topología 1 maneja gran cantidad de modos con altas eficiencias en cada uno de ellos que sumado a su tiempo de establecimiento y versatilidad se

considera un convertidor muy completo, pero a su vez su cantidad de elementos y complejidad en el control la hacen menos atractiva para aplicaciones a pequeña escala. Al contrario de la topología 1 la topología 2 nos ofrece una menor cantidad de elementos y a su vez nos ofrece una alta eficiencia con respecto a la topología 1, otra gran ventaja es la simplicidad en el manejo de su control.

Se puede observar que la eficiencia respecto a los modos de funcionamiento es similar para ambas topologías, dando la ventaja a la topología 1 por su variedad de modos.

## **6. Conclusiones**

En las instalaciones fotovoltaicas aisladas se debe tener la capacidad de manejar los flujos de potencia provenientes del panel fotovoltaico y las baterías del sistema, esta tarea es facilitada por los convertidores DC-DC, para este caso se contó con dos topologías de convertidores DC-DC de tres puertos no aislados.

Haciendo uso de los convertidores DC-DC de tres puertos no aislados, podemos obtener una mayor densidad de potencia en comparación con topologías semi-aisladas y aisladas, esto debido a que cuentan con un menor número de elementos que los conforman, dando paso a convertidores más compactos y, en consecuencia, alcanzando eficiencias mucho mayores. En el caso de la topología 1, se pueden apreciar las altas eficiencias alcanzadas y la gran versatilidad que ofrece su selector de modos, el cual permite que esta pueda adaptarse a diferentes situaciones de uso para obtener mejores resultados de funcionamiento, desactivando controladores que no son necesarios y manteniendo un flujo de corriente por la batería solo cuando el sistema así lo requiera, aumentando así la vida útil de las mismas, siendo esto un punto importante a tomar en cuenta a la hora de una implementación de este para instalaciones fotovoltaicas aisladas,

mientras tanto, en la topología 2 contamos con la misma cantidad de puertos y un control más simple, sin embargo, hay limitaciones en su versatilidad puesto que este controlador solo ofrece tres modos de funcionamiento, limitando así la capacidad de adaptación del convertidor a situaciones que se dan comúnmente en estas instalaciones, una de las consecuencias más negativas de esto es el flujo constante de corriente por la batería, esto repercute en su vida útil, ocasionando que sea menos viable que la anteriormente mencionada.

En conclusión, las topologías de convertidores DC-DC de tres puertos ofrecen una solución al manejo del flujo de potencias en una instalación fotovoltaica no aislada, aumentando su eficiencia respecto a soluciones más tradicionales y dándoles una mayor viabilidad de implementación.

## Referencias Bibliográficas

- Guacaneme, J. (2015). *Control de puentes activos duales (DABs) en sistemas bidireccionales de alimentación con alta densidad de potencia* (tesis doctoral). Universidad Politécnica de Valencia. Recuperado de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/61627/Guacaneme%20-%20Control%20de%20puentes%20activos%20duales%20%28DABs%29%20en%20sistemas%20bidireccionales%20de%20alimentaci%C3%B3n%20....pdf?sequence=1>
- Zhang, N., Sutanto, D. y Muttaqi K. (2016). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032115013465>
- Vargas, L. y Rodríguez, S. (2017). *Convertidor DC/DC elevador dual intercalado para aplicaciones en sistemas fotovoltaicos* (tesis pregrado). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. Recurado de biblioteca UIS <http://tangara.uis.edu.co/>
- Sun Supply. (s.f). *Componentes de un sistema de energía solar*. Disponible en la web. Recuperado de <https://www.sunsupplyco.com/componentes-de-un-sistema-de-energia-solar/>
- Santillán, A. (2016). *Estudio de la incorporación de baterías en sistemas fotovoltaicos* (tesis posgrado). Universidad de Barcelona, España. Recurado de <http://diposit.ub.edu/dspace/handle/2445/101966>
- Energía solar. (s.f). *energía solar*. Recuperado de <https://solar-energia.net/>
- Cardona, S. y Ospina, S. (2015). *Construcción de módulo convertidor CC-CC elevador, para prácticas en el laboratorio del programa ingeniería mecatrónica* (tesis pregrado). Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia. Recurado de <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/5633/6213192C268.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- N. Zhang, D. Sutanto & K. M. Muttaqi. (2016, abril). *A review of topologies of three-port DC-DC converters for the integration of renewable energy and energy storage system*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032115013465>
- Vázquez N., Sanchez C., Hernández C., Vázquez E., García L., Arau J. (2014, marzo, 2). *A Different Three-Port DC/DC Converter*. *International Journal of Photoenergy*. Recuperado de <https://new.hindawi.com/journals/ijp/2014/692934/>
- Ding, Shun & Wu, Hongfei & Xing, Yan & Fang, Yu & Ma, Xudong. (2013). *Topology and control of a family of non-isolated three-port DC-DC converters with a bidirectional cell*.

- Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC. 1089-1094. 10.1109/APEC.2013.6520435.
- Weidong Xiao (2017). *Photovoltaic Power System* (2017). Chichester, UK, John Wiley & Sons Ltd.
- J, Ruiz & A, Beristáin & Sosa Tinoco, Ian & H, Hernandez. (2010). Estudio del Algoritmo de Seguimiento de Punto de Máxima Potencia Perturbar y Observar. *Revista de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación* 1870-9532. 8. 17.