

Diseño de un convertidor DC-DC elevador para un inversor fotovoltaico multinivel en topología de puentes H en cascada

Carlos Hernán Noriega Anaya y Martin Elías Daza Cardona

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Electricista

Director

Dra. María Alejandra Mantilla Villalobos

Doctora en Ingeniería

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingeniería Físico Mecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Bucaramanga

2020

Dedicatoria

A Dios por ser mi apoyo espiritual y permitirme gozar de salud para culminar mis estudios universitarios.

A mi mamá Luz Marina Anaya y a mi abuela Ana Rosa Esparza por ser el motor de mi vida, mis maestras y mentoras de vida. Por enseñarme a ser una mejor persona cada día y a luchar por mis sueños, por sus consejos, por todo su apoyo, sacrificio, amor y ayuda.

A mi hermano William por su apoyo incondicional, su compañía, sus consejos y su motivación para terminar este proyecto.

A toda mi familia por la confianza brindada y su apoyo incondicional en las decisiones tomadas.

A mis compañeros de la carrera y de la universidad, por hacer agradable mi paso por la universidad y por todas las experiencias compartidas.

Carlos Hernán Noriega Anaya

Vale la pena soñar, sin sueños todos los días son iguales.

Dedicatoria

Fundamentalmente, agradecimientos eternos mis padres y a mi familia por el apoyo emocional y económico, y por la formación recibida por su parte.

A mi compañero Carlos Noriega Anaya por el apoyo y la motivación constante durante la carrera y principalmente para el desarrollo de este trabajo de grado.

Martin Elías Daza Cardona

Agradecimientos

A la Dra. María Alejandra Mantilla Villalobos, principalmente, porque nos compartió acerca de su experiencia en el campo de la electrónica de potencia para iniciar y culminar este trabajo de grado; gracias por su tiempo, dedicación, motivación, orientación y liderazgo para desarrollar este proyecto, sus consejos y sugerencias fueron de gran importancia para el desarrollo de la tesis y nuestro crecimiento personal.

A nuestra alma mater, la Universidad Industrial de Santander por ser nuestra segunda casa, a los profesores que influyeron en nuestra formación personal y profesional.

Carlos Hernán Noriega Anaya.

Martín Elías Daza Cardona.

Tabla de Contenido

Introducción	13
1 Objetivos	14
1.1 Objetivo general.....	14
1.2 Objetivos Específicos.....	15
2 Marco teórico	15
2.1 Generador Fotovoltaico.....	16
2.2 Convertidores DC-DC	19
2.3 Inversores de Potencia	20
2.4 Filtro de conexión a la red	23
2.5 Estrategias de control del sistema fotovoltaico de conexión a la red	25
3 Diseño y control del convertidor DC-DC elevador	25
3.1 Cálculo y diseño de los parámetros del convertidor	25
3.1.1 Análisis con el interruptor cerrado.....	27
3.1.2 Análisis con el interruptor abierto.....	28
3.2 Diseño y simulación del algoritmo para el seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT)	32
3.3 Modulación por ancho de Pulsos (PWM) para el convertidor DC-DC elevador.....	35
4 Diseño y control del inversor puente H en cascada de tres niveles y del filtro de conexión a la red.	37

4.1 Inversor puente H en cascada de tres niveles.....	38
4.2 Diseño del filtro LCL de conexión a la red.....	39
4.3 Sistema de control.....	43
4.3.1 Modulación PWM para el inversor en topología puente H en cascada de tres niveles. .	43
4.3.2 Control de corriente.	47
4.3.3 Generación de las señales de referencia.....	52
5 Análisis de la interconexión del sistema y la red de baja tensión.....	55
5.1 Caso 1	57
6 Conclusiones.....	61
7 Recomendaciones	63
Referencias Bibliográficas.....	65
Apéndices	69

Lista de Tablas

Tabla 1 Características eléctricas de un panel solar referencia EP156P-72-320W.	18
Tabla 2 Características del arreglo fotovoltaico de 2 paneles EP156P-72-320W conectados en paralelo.	19
Tabla 3 Valores de tensión y ciclo útil para el diseño del convertidor.	29
Tabla 4 Parámetros del convertidor DC-DC elevador.	32
Tabla 5 Condiciones y características del ciclo útil del transistor.	34
Tabla 6 Parámetros iniciales del algoritmo P&O	34
Tabla 7 Parámetros para el diseño y control del inversor en puente H de tres niveles.	39
Tabla 8 Valores de los componentes del filtro LCL.	42
Tabla 9 Tensiones de salida obtenidas a través de la modulación unipolar partiendo del estado de los dispositivos de conmutación del inversor.	46
Tabla 10 Reglas de sintonía del segundo método de Ziegler-Nichols.	48
Tabla 11 Análisis del sistema según los criterios de Routh Hurwitz.	49
Tabla 12 Ganancias del control PI para el seguimiento de corrientes de referencia. ..	50
Tabla 13 Parámetros calculados para el Convertidor DC-DC.	71
Tabla 14 Parámetros del Convertidor DC-DC para la consideración 2.	73
Tabla 15 Parámetros definitivos del convertidor DC-DC.	75

Lista de Figuras

Figura 1 Esquema general del sistema de generación fotovoltaica de conexión a la red	16
Figura 2 Curvas características del generador fotovoltaico.....	17
Figura 3 Curvas características del arreglo fotovoltaico a 25°C y diferentes condiciones de irradiancia [kW/m ²]......	19
Figura 4 Esquema y formas de onda de la tensión de salida de inversores multinivel.	22
Figura 5 Esquema eléctrico del inversor de potencia CHB de tres niveles trifásico. .	23
Figura 6 Esquema por fase de filtro LCL con resistencia de amortiguamiento.....	24
Figura 7 Convertidor DC-DC elevador.....	26
Figura 8 Circuito equivalente al convertidor DC-DC elevador y con el algoritmo MPPT.....	33
Figura 9 Algoritmo Perturbar y Observar (P&O) con rango del ciclo útil D.	34
Figura 10 Esquema de generación de la señal PWM para el convertidor DC-DC.	36
Figura 11 Señales PWM del convertidor elevador.	37
Figura 12 Diagrama de bloques por fase del inversor en topología puente H de tres niveles y sus estrategias de control para inyección de potencia a la red.....	38
Figura 13 Circuito equivalente para el diseño del filtro LCL.	40
Figura 14 Reducción del pico de la resonancia del circuito con y sin resistencia.	42
Figura 15 Forma de onda de un PWM bipolar.	44
Figura 16 Forma de onda de un PWM unipolar.	45
Figura 17 Esquema empleado para la modulación PMW Unipolar para el inversor CHB en topología puente H de tres niveles.	47

Figura 18 Esquema de bloques general del control de corriente utilizado.	48
Figura 19 Esquema para el control PI para el seguimiento de corrientes de referencia.	51
Figura 20 Forma de onda resultante para la corriente de referencia empleando un control PI.....	51
Figura 21 Esquema de control PI del bus de continua del inversor de potencia.	53
Figura 22 Sistema de generación fotovoltaico conectado a una red de baja tensión. .	56
Figura 23 Irradiancia incidente en los generadores fotovoltaicos para el caso 1.....	58
Figura 24 Caso 1: Señales del convertidor y el bus de continua.	59
Figura 25 Caso 1: Gráficas de corriente suministrada a la red.	60
Figura 26 Conexión y control del convertidor DC-DC con carga resistiva a la salida.	69
Figura 27 Perfil de irradiancia para análisis de la corriente en el inductor del Convertidor DC-DC.....	70
Figura 28 Señales del convertidor, teniendo en cuenta los parámetros de diseño.....	72
Figura 29 Señales del convertidor, teniendo en cuenta los parámetros de diseño y operativos.....	74
Figura 30 Señales del convertidor, parámetros definitivos del convertidor DC-DC..	75
Figura 31 Esquema e conexiones del inversor y su conexión a la red a través del filtro LCL.....	77
Figura 32 Corrientes a suministrar a la red de baja tensión.....	77

Lista de Apéndices

Apéndice A Señales del Convertidor DC-DC elevador.....	69
Apéndice B Señales obtenidas del Inversor con las estrategias de generación de la referencia y control de corriente	77

Resumen

Título: Diseño de un convertidor DC-DC elevador para un inversor fotovoltaico multinivel en topología de puentes H en cascada.*

Autor: Carlos Hernán Noriega Anaya, Martín Elías Daza Cardona**

Palabras Clave: Convertidor elevador, inversor de potencia, sistema fotovoltaico, control de potencia activa, seguimiento del punto de máxima potencia.

Descripción:

El presente trabajo de grado aborda de una forma puntual el estudio del sistema de interconexión de generadores fotovoltaicos a la red eléctrica, considerando el inversor multinivel en topología de puentes H en cascada. Para esto, se aborda el diseño del sistema de convertidores electrónicos de potencia (convertidores DC-DC) para el inversor multinivel en mención, junto con sus estrategias de control. Específicamente se consideran las topologías de convertidor DC-DC elevador e inversor de tres niveles en topología de puentes H en cascada (CHB, por sus siglas en inglés).

En primer lugar, se presenta el diseño de un convertidor DC-DC elevador (tipo *boost*) implementado junto a una estrategia de control enfocada en el seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) de los generadores fotovoltaicos, algoritmo denominado Perturbar y Observar (P&O).

Seguidamente, se establecen los parámetros de operación del inversor, se realiza el cálculo y diseño del filtro LCL de conexión a la red de baja tensión, se diseña la estrategia de modulación PWM unipolar aplicada al inversor de tres niveles en topología CHB, se establece una estrategia para la sincronización de las corrientes inyectadas a la red, y finalmente se implementa una estrategia de control de corriente para el seguimiento de la señal de referencia.

Finalmente se realiza la interconexión del generador fotovoltaico, el sistema de convertidores DC/DC, el inversor CHB y la red de baja tensión, para lo cual se establece una estrategia de generación de las corrientes de referencia, con el fin de controlar la potencia activa entregada por el inversor a la red y regular de la tensión del lado de continua del inversor. La verificación del funcionamiento del sistema, junto con las estrategias de control, se realizó mediante simulaciones en el software MATLAB/Simulink®.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingeniería Físico Mecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones.
Director: María Alejandra Mantilla Villalobos. Doctora en Ingeniería.

Abstract

Title: Design of a step-up DC-DC converter for a multilevel photovoltaic inverter in cascade H-bridge topology.*

Authors: Carlos Hernán Noriega Anaya, Martin Elías Daza Cardona**

Key Words: Boost converter, power inverter, photovoltaic system, active power control, Maximum Power Point Tracker.

Description:

The present degree project is about the study of the interconnection system of photovoltaic generators to the electrical grid, considering the multilevel inverter in cascade H-bridge topology. For this, the system of electronic power converters (DC/DC Converters) for the mentioned multilevel inverter was designed, with its control strategies. Specifically, it was considered the boost DC-DC converter and the three-level inverter Cascaded H-bridge topology.

First, it is introduced the design of a boost DC-DC converter with a control strategy focused on monitoring the maximum power point (MPPT) of photovoltaic generators, the Perturb and Observe algorithm (P&O).

Next to that, the inverter operating parameters were reviewed, and the calculation and design of the LCL filter for connection to the low voltage grid was performed. Besides, it was designed the unipolar PWM modulation strategy applied to the three-level inverter in CHB topology and a strategy for the synchronization of the currents injected into the network. Finally, a current control strategy was implemented to follow the reference signal.

Ultimately, the interconnection of the photovoltaic generator was performed, with the DC/DC converter system, the CHB inverter and the low voltage grid, for this a strategy for generating the reference currents was established, in order to control the active power delivered by the inverter to the grid, and regulate the voltage on the DC side of the inverter. The verification of the operation of the system, with the control strategies, was carried through simulations in the MTALAB/Simulink® software.

* Degree Work

** Facultad de Ingeniería Físico Mecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: María Alejandra Mantilla Villalobos. Doctora en Ingeniería.

Introducción

En Colombia, según el Plan de Expansión de Referencia Generación - Transmisión 2015 – 2029, expedido por la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME), se resalta de manera enfática la generación de energía eléctrica a partir del aprovechamiento de los recursos naturales como la radiación solar, las corrientes de viento, biomasa, entre otras. La UPME busca impulsar tanto la investigación, como el desarrollo y ejecución de nuevas tecnologías aplicadas hacia el campo de la generación de energía eléctrica principalmente a base de paneles solares, para ello propone varios proyectos que involucran la generación de energía fotovoltaica distribuida a pequeña y gran escala, teniendo en cuenta parámetros de calidad, eficiencia energética, optimización, seguridad y viabilidad de proyectos, es decir, se plantea la búsqueda e implementación de nuevas políticas de generación.

Una de las tecnologías relevantes en cuanto al campo de la generación de energías no convencionales, corresponde a la energía solar fotovoltaica, la cual, se obtiene al aprovechar la radiación electromagnética proveniente del sol que llega a la tierra, y se transforma en energía eléctrica mediante celdas fotovoltaicas.

Generalmente, el proceso de generación de energía eléctrica empleando esta tecnología a pequeña o gran escala, requiere de un grupo de elementos o sistemas eléctricos y electrónicos, como lo son: los paneles fotovoltaicos, los convertidores electrónicos de potencia, y la carga, que puede ser, un usuario o sistema independiente de consumo energético, y/o una red de distribución de la energía.

El presente trabajo de grado aborda específicamente el estudio del sistema de convertidores electrónicos de potencia, junto con sus estrategias de control, para la interconexión de generadores fotovoltaicos a la red eléctrica; considerando de forma puntual el diseño de un sistema de convertidores DC/DC, tipo elevadores (*boost converters*), acoplados a un inversor multinivel en topología de puentes H en cascada.

Gracias a la aplicación de este tipo de tecnologías, hoy día se puede pensar en el desarrollo eficiente de energía sostenible, por tal motivo, a lo largo de este trabajo de investigación, se analiza el sistema utilizado para la generación de energía a base de paneles fotovoltaicos, y cuya finalidad del sistema corresponde a la conexión del generador a la red de baja tensión, teniendo en cuenta los procesos de conversión y transformación de la energía.

1 Objetivos

1.1 Objetivo general.

Diseñar un convertidor DC-DC elevador controlado para el seguimiento del punto de máxima potencia de un generador fotovoltaico, acoplado a un inversor de tres niveles en topología de puentes H en cascada (CHB, por sus siglas en inglés) de conexión a la red de baja tensión.

1.2 Objetivos Específicos.

Diseñar un convertidor DC-DC elevador para un sistema de generación fotovoltaica de conexión a la red.

Simular una estrategia de control para el convertidor DC-DC con el fin de realizar el seguimiento del punto de máxima potencia del generador fotovoltaico.

Simular un inversor de tres niveles en topología de puente H en cascada de conexión a la red, con su correspondiente sistema de control.

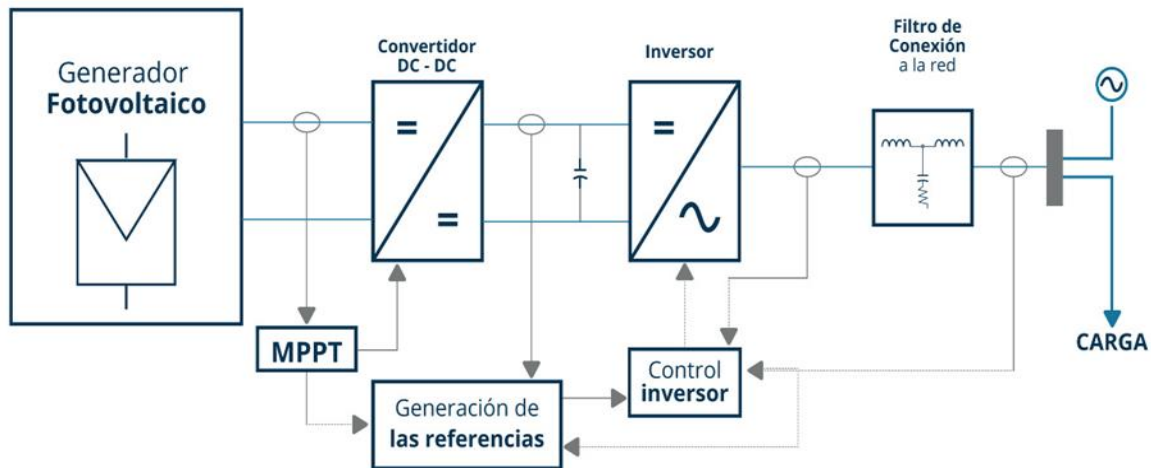
Acoplar el convertidor DC-DC diseñado junto con el inversor CHB de tres niveles, verificando el funcionamiento del convertidor con respecto al seguimiento del punto de máxima potencia del generador fotovoltaico y la inyección de potencia a la red.

2 Marco teórico

En este capítulo se contextualizan, de manera general, los sistemas fotovoltaicos con sus respectivas etapas destinadas a la transformación de la energía eléctrica y posterior conexión del sistema eléctrico a la red de baja tensión. Asimismo, para el análisis de los sistemas de conversión y transformación de la energía, es necesaria la implementación de sistemas de control para los convertidores electrónicos del sistema, teniendo en cuenta los diferentes requisitos para la interconexión del generador a la red de baja tensión. En la figura

1, se pueden observar las etapas de potencia y control para un sistema fotovoltaico de conexión a la red.

Figura 1 Esquema general del sistema de generación fotovoltaica de conexión a la red



Nota: Adaptado de Mantilla, M. (2016). Control de generadores fotovoltaicos con funciones de filtrado activo en sistemas trifásicos distorsionados y desequilibrados. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Universidad Industrial de Santander.

2.1 Generador Fotovoltaico

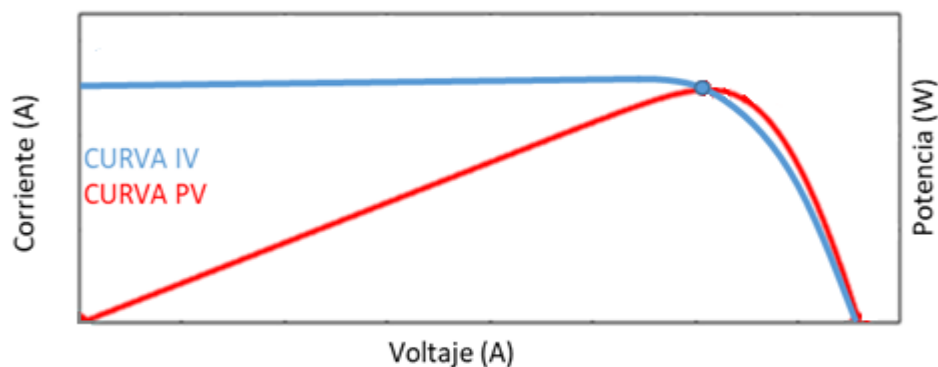
Un generador fotovoltaico está conformado por un conjunto de paneles solares fotovoltaicos, los cuales generan energía eléctrica aprovechando el efecto fotoeléctrico, producido de la interacción entre las partículas luminosas provenientes del sol y las propiedades de las celdas fotoeléctrica, en otras palabras, la energía producida depende de la incidencia de la luz solar en el área superficial del panel (Garciglia, s.f.).

El conjunto de paneles fotovoltaicos, independientemente de la configuración de la conexión entre uno o más paneles, se denomina un sistema de generadores fotovoltaicos, cuya

conexión final depende de la aplicación para la cual sea dimensionado, como es el caso de la autogeneración de energía, generación distribuida, o generación eléctrica, según la potencia suministrada por el arreglo fotovoltaico.

Vale la pena mencionar, que la potencia entregada por los generadores fotovoltaicos, varía en cuanto a factores como la radiación solar incidente en los paneles solares y la temperatura a la cual se encuentran operando; estos fenómenos climáticos afectan el rendimiento del sistema, y junto con el comportamiento no lineal de las variables eléctricas de los generadores, se hace más complejo el análisis del proceso de generación para obtener una mayor eficiencia del sistema. Teniendo en cuenta el comportamiento no lineal del generador fotovoltaico, se presenta la particularidad de que los paneles solares solo pueden entregar la máxima potencia en un solo punto, dicho punto varía para cualquier condición de irradiancia y temperatura incidente en los paneles. En la figura 2 se muestran las curvas características típicas de un generador fotovoltaico, como lo es la curva PV (Potencia vs. Voltaje) y la curva IV (Corriente vs. Voltaje) para condiciones uniformes de irradiancia y temperatura; en esta figura se evidencia claramente la existencia de un punto de máxima potencia (De Yong et al., 2016).

Figura 2 Curvas características del generador fotovoltaico.



Nota: Representación del único punto de máxima potencia. Según las curvas IV y PV de un generador fotovoltaico o una irradiancia y temperatura dada.

De esta manera, para un funcionamiento óptimo del sistema de generación de energía basado en paneles solares, es necesaria la aplicación de estrategias de control que busquen el seguimiento del punto de máxima potencia del generador fotovoltaico. Esta estrategia de control generalmente es aplicada en el convertidor DC-DC conectado a la salida del generador.

Para el desarrollo de este trabajo de grado se eligieron tres arreglos fotovoltaicos, cada uno conformado por dos paneles conectados en paralelo, del fabricante EOPLLY NEW ENERGY TECHNOLOGY CO LTD. Las principales especificaciones del panel considerado, bajo una irradiancia de $\frac{1000W}{m^2}$ y una temperatura de 25°C, se encuentran en la tabla 1:

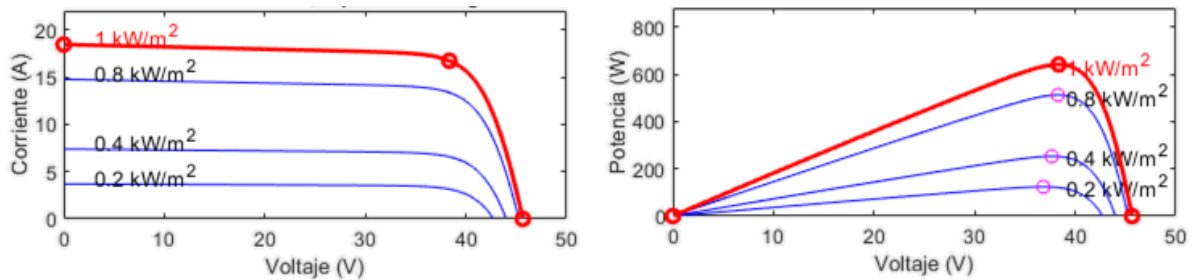
Tabla 1 Características eléctricas de un panel solar referencia EP156P-72-320W.

Panel solar EOPLLY NEW ENERGY TECHNOLOGY EP156P-72-320W	
Tipo de celdas	Policristalinas
Potencia máxima, P_{max}	320 [W]
Tensión de circuito abierto, V_{OC}	45,65 [V]
Corriente de cortocircuito, I_{CC}	9,216 [A]
Tensión en el punto máximo de potencia, V_{mpp}	38,35 [V]
Corriente en el punto máximo de potencia, I_{mpp}	8,359 [A]

Nota: adaptado de EOPLLY NEW ENERGY TECHNOLOGY.

Seguidamente, se presentan las curvas características y características eléctricas correspondientes a cada arreglo fotovoltaico, que corresponde a la conexión en paralelo de dos paneles EP156P-72-320W.

Figura 3 Curvas características del arreglo fotovoltaico a 25°C y diferentes condiciones de irradiancia [kW/m²].



Tomado del bloque PV Array de Simulink® seleccionando la referencia EP156P-72-320W.

Tabla 2 Características del arreglo fotovoltaico de 2 paneles EP156P-72-320W conectados en paralelo.

Potencia máxima, P_{max}	640 [W]
Tensión en el punto máximo de potencia, V_{mpp}	38,35 [V]
Corriente en el punto máximo de potencia, I_{mpp}	16,718 [A]

2.2 Convertidores DC-DC

Un convertidor DC-DC es un conjunto de dispositivos electrónicos que permiten transformar una señal en corriente continua, en una señal de igual naturaleza (señal en corriente continua), pero de diferente amplitud. En seguida se mencionan las topologías más comunes de los tipos de convertidores DC-DC:

- Convertidores reductores (*buck converters*).
- Convertidores elevadores (*boost converters*).
- Convertidores elevadores-reductores (*buck-boost converters*).
- Convertidores resonantes.

Para el desarrollo del presente trabajo de grado, se resalta el tema del convertidor elevador o *boost converter*; entre los tipos de convertidores elevadores, se encuentran las siguientes topologías (Mantilla, M., 2016):

- Convertidor DC-DC elevador convencional.
- Convertidor DC-DC elevador intercalado (*Interleaved boost converter*) y convertidor DC-DC elevador intercalado con inductor acoplado.
- Convertidores DC-DC elevadores multinivel. El más común de estos es el convertidor de tres niveles.
- Convertidores de alta elevación DC-DC con inductores acoplados y/o con condensadores conmutados.

Específicamente, para el desarrollo del trabajo propuesto se tiene en cuenta el convertidor DC-DC elevador convencional, cuyo valor agregado está dado por el funcionamiento e implementación de técnicas de control, específicamente el algoritmo de búsqueda del punto de máxima potencia a través del proceso iterativo de Perturbar y Observar (P&O), con el fin de dar un manejo apropiado y eficiente a la potencia entregada por los generadores fotovoltaicos. El diseño y simulación de las estrategias de control para este convertidor serán explicados en el capítulo 3 del presente libro.

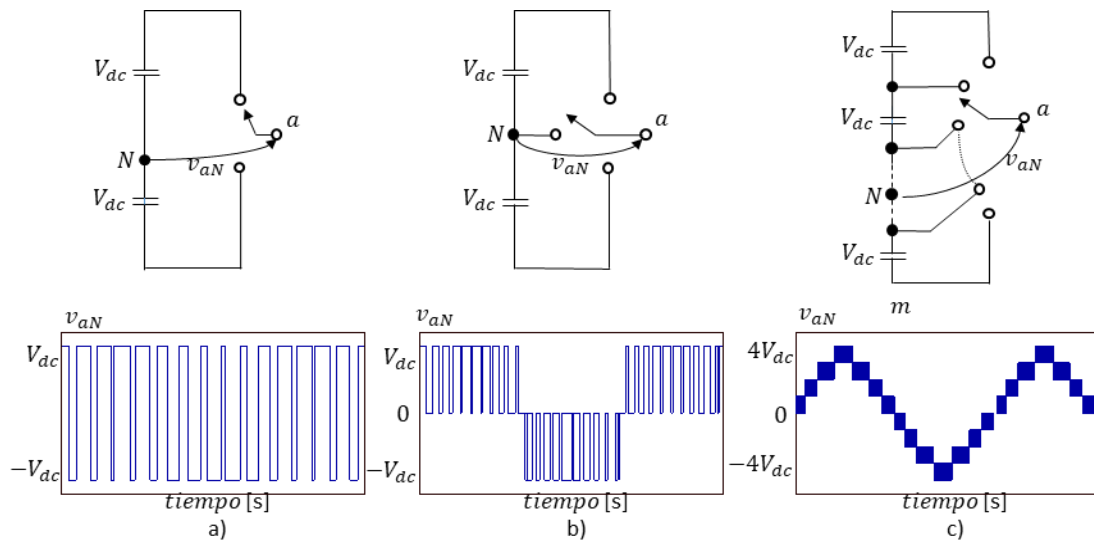
2.3 Inversores de Potencia

Un inversor de potencia está conformado por dispositivos semiconductores de potencia, cuyo propósito principal es modificar señales en DC (Corriente Continua) y convertirlas en señales en AC (Corriente Alterna). Para la implementación de estos inversores, se emplean

dispositivos de conmutación como: transistores bipolares de puerta aislada (IGBT, *Insulated Gate Bipolar Transistors*), tiristores desactivados por compuerta (GTO, *Gate - Turn - Off Thyristor*), y tiristores controlados por puerta integrada (IGCT, *Integrated Gate Commutated Thyristor*), entre otros.

Dentro de las topologías de los inversores, se destacan los inversores multinivel (Wu and Narimani, 2017), los cuales pueden ser escalados para aplicaciones en los rangos de media y alta potencia. Especialmente, con el empleo de los inversores multinivel y gracias al desarrollo y el avance de las tecnologías en los dispositivos semiconductores, se obtiene como resultado una reducción en cuanto a pérdidas causadas por la conmutación de los elementos, y también un mejoramiento de la calidad de la señal de salida del circuito, logrando obtener como resultado una forma de onda de corriente alterna con bajo contenido armónico, mejorando la eficiencia del sistema eléctrico (Almeida, 2018).

En la figura 4 se observan tres diagramas diferentes de inversores de potencia y sus formas de onda de tensión a la salida; en (a) se muestra el esquema para obtener una forma de onda de la tensión a la salida de dos niveles, V_{dc} y $-V_{dc}$ (se referencia la tensión al punto neutro N); por otro lado, en (b) se presenta un esquema para obtener a la salida tres niveles de tensión, V_{dc} , $-V_{dc}$ y $0[V]$; y en (c) se representa el esquema de conexión para obtener nueve niveles de tensión a la salida del inversor.

Figura 4 Esquema y formas de onda de la tensión de salida de inversores multinivel.

Nota: Las figuras corresponden al esquema y formas de onda de la tensión de salida de inversores multinivel. a) dos niveles, b) tres niveles, c) nueve niveles. Adaptado de José Rodríguez et al (2009). Tomado de: Multilevel Converters: An Enabling Technology for High-Power Applications. Proceedings of the IEEE, 97,1786-1817.

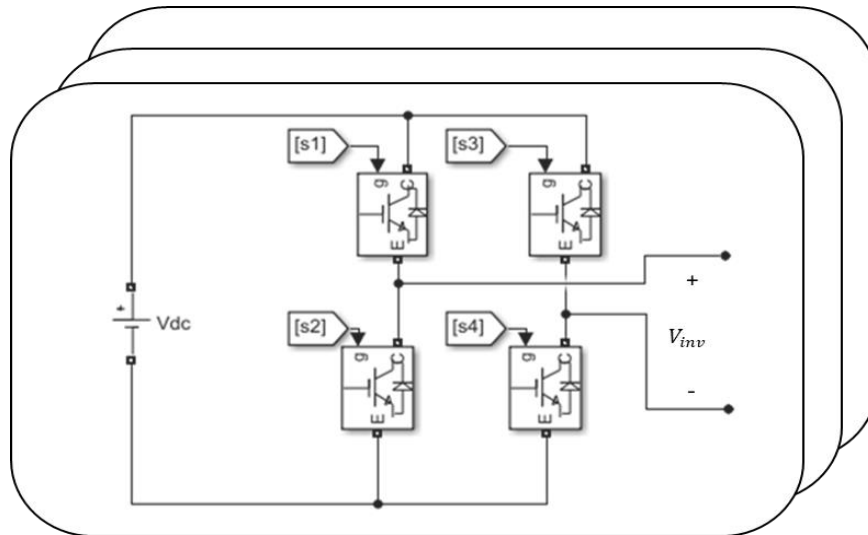
A continuación, se presentan los tres tipos de inversores multinivel más conocidos:

- Convertidor con conexión en cascada de puentes monofásicas (CHB o *Cascaded H-Bridge*).
- Convertidor con condensadores flotantes (FC o *Flying Capacitor*).
- Convertidor con fijación por diodos (NPC o *Neutral Point Clamped*).

En este trabajo de grado, se considera la topología de inversor de potencia CHB de tres niveles trifásico, cuyo diagrama circuital se muestra en la figura 5. En esta figura se presentan tres cuadros, el primero corresponde a un puente completo monofásico para la fase *a*, los otros dos cuadros son réplicas exactas del primero, pero estos son empleados para las fases *b* y *c*. El

diseño y simulación de las estrategias de control para este inversor serán explicados en el capítulo 4 del presente libro.

Figura 5 Esquema eléctrico del inversor de potencia CHB de tres niveles trifásico.



2.4 Filtro de conexión a la red

El funcionamiento del inversor, tiene como objetivo convertir las señales en DC y transformarlas en señales de AC, haciendo uso de estrategias de control para la conmutación de los IGBT. Las señales a la salida del inversor poseen un alto contenido de armónicos de alta frecuencia, por esta razón, es necesario el diseño y la aplicación de filtros, con el fin de reducir este alto contenido de armónicos y así entregar una mejor calidad de la potencia a la red eléctrica, evitando pérdidas y funcionamientos anormales en los sistemas eléctricos y/o electrónicos conectados a la red.

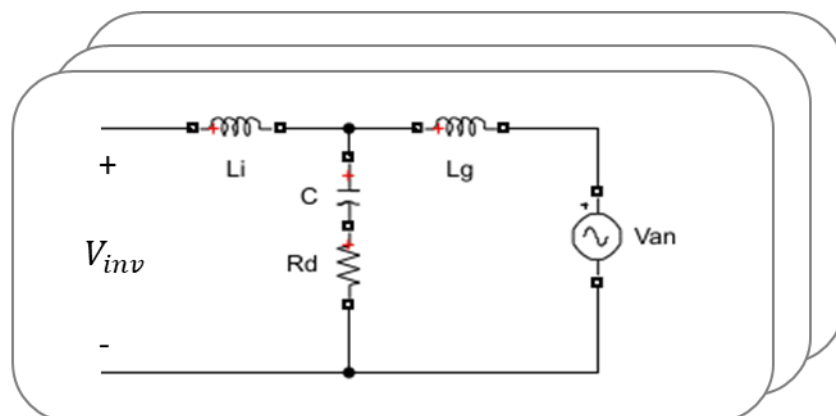
En la actualidad, se tienen diferentes tipos de filtros, dentro de los cuales se encuentran los filtros tipo L (filtro de primer orden con un inductor conectado entre la salida del inversor

y la red), y los filtros de segundo y tercer orden, como lo son los filtros LC y los filtros LCL, respectivamente (Jain y Kalla, 2016).

Frente a los resultados de la respuesta y comportamiento de los filtros, se opta por el uso del filtro LCL (Villa, 2011) para el desarrollo de este trabajo de grado. La gran ventaja de este filtro es que a altas frecuencias la atenuación de las señales es mayor, ya que la respuesta cae con una pendiente de 60 dB/dec , mientras que para el caso del filtro L, cae a razón de 20 dB/dec . Generalmente para los filtros LCL se conecta una resistencia, denominada resistencia de amortiguamiento (R_d), en serie con el capacitor (C), con el fin de disminuir considerablemente el pico a la frecuencia de resonancia del filtro.

En la figura 6 se muestra la configuración del filtro utilizado en el proyecto, el cual será estudiado en el capítulo 4 de este libro donde se realizan los cálculos para el diseño del filtro, donde L_i corresponde a la resistencia interna del inductor del lado del inversor, y L_g hace referencia a la resistencia interna del inductor del lado de la red eléctrica.

Figura 6 Esquema por fase de filtro LCL con resistencia de amortiguamiento.



2.5 Estrategias de control del sistema fotovoltaico de conexión a la red

Para la conexión de un sistema fotovoltaico a una red de baja tensión, se consideran las siguientes estrategias para ejercer control del sistema (ver figura 1):

- Seguimiento del punto de máxima potencia.
- Generación de corrientes de referencia: control de la potencia activa inyectada a la red, sincronización con la red, y control de las tensiones del lado de continua de inversor.
- Control del inversor: control de corriente y modulación PWM.

Con la aplicación de cada una de las estrategias mencionados anteriormente para la conexión a la red del sistema fotovoltaico, se busca: garantizar la extracción de la máxima potencia del generador fotovoltaico, la calidad de las señales a suministrar a la red ya que se busca la inyección de señales sinusoidales puras a la red, y finalmente la sincronización del sistema fotovoltaico con la red.

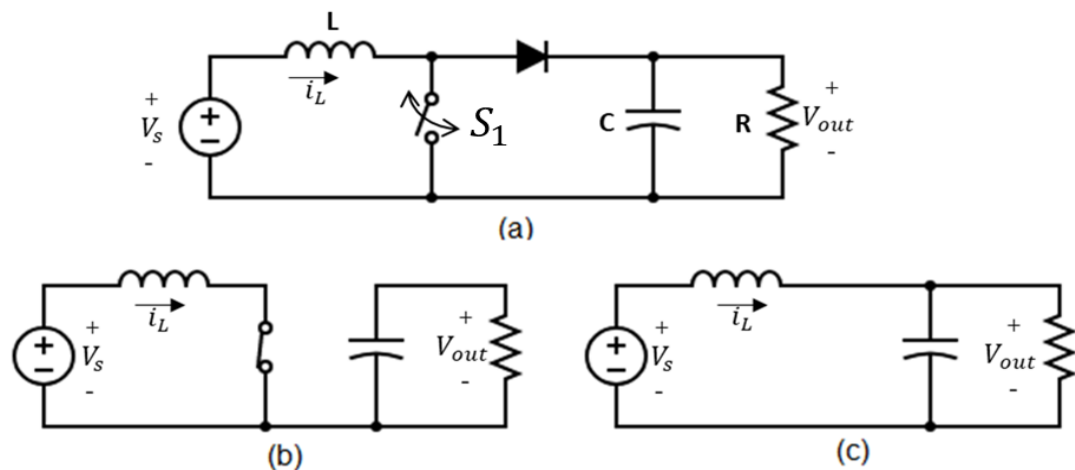
Las estrategias empleadas para el control del sistema fotovoltaico son presentadas en los capítulos 3 y 4 de este trabajo.

3 Diseño y control del convertidor DC-DC elevador

3.1 Cálculo y diseño de los parámetros del convertidor

A continuación, se presentan los diferentes cálculos y consideraciones para el diseño del convertidor DC-DC elevador. El análisis del mismo se realizó teniendo en cuenta los dos modos de operación del transistor conmutado, el cual fue modelado como un interruptor ideal. En la figura 7 se muestra el circuito electrónico representativo del convertidor DC-DC elevador trabajado en esta tesis, considerando una carga resistiva a la salida, y los circuitos equivalentes obtenidos para cada uno de los dos modos de operación del transistor o bien denominado interruptor.

Figura 7 Convertidor DC-DC elevador.



Nota: (a) Topología de convertidor elevador DC-DC elevador. (b) Circuito equivalente con interruptor S_1 cerrado. (c) Circuito equivalente con interruptor S_1 abierto.

Para el diseño y estudio del convertidor, es necesario analizar los respectivos modos de operación del interruptor, definidos en las figuras 8 (b) y (c), por lo tanto, se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones (Hart, 2001):

- La operación del circuito se analiza en régimen permanente.
- La corriente en el inductor siempre es positiva (modo de operación continuo).

- Se asume una tensión constante a la salida del convertidor, es decir, el condensador es muy grande.
- El comportamiento de los componentes es ideal.
- El periodo de conmutación del interruptor S_1 es T , por tanto, el tiempo en que el interruptor está cerrado está dado por DT y el tiempo en que está abierto está dado por $(1-D)T$, donde D es el ciclo de trabajo.

Según lo mencionado anteriormente, se inicia el análisis del convertidor teniendo en cuenta principalmente la corriente por el inductor.

3.1.1 Análisis con el interruptor cerrado.

Con base en el circuito equivalente del convertidor, se tiene que, con el interruptor cerrado, el diodo no conduce pues está polarizado en inversa, por tanto, con la ley de corrientes de Kirchhoff se tiene la siguiente ecuación:

$$v_L = V_S = L \frac{di_L}{dt}$$

Por lo tanto, la variación de la corriente es constante, la corriente aumenta linealmente con el interruptor cerrado. De esta forma se da paso a la ecuación 2.1, donde f corresponde a la frecuencia de conmutación del inductor.

$$(\Delta i_L)_{\text{cerrado}} = \frac{V_S D}{Lf} = \frac{V_S DT}{L} \quad (2.1)$$

3.1.2 Análisis con el interruptor abierto.

La corriente en el inductor no puede cambiar de forma instantánea, por lo que el diodo se polariza en directa y permite el paso de la corriente al condensador y a la salida del convertidor. La tensión en el inductor está dada por:

$$v_L = V_S - V_{out} = L \frac{dI_L}{dt}$$

De igual forma la variación de la corriente en el inductor será:

$$(\Delta i_L)_{abierto} = \frac{(V_S - V_{out})(1 - D)T}{L} \quad (2.2)$$

Como se asumió la operación del circuito en régimen permanente, la variación de la corriente neta debe ser cero, mediante las ecuaciones 2.1 y 2.2, se tiene:

$$(\Delta i_L)_{cerrado} + (\Delta i_L)_{abierto} = 0 \quad (2.3)$$

Reemplazando la ecuación anterior y despejando V_{out} , se tiene:

$$V_{out} = \frac{V_S}{1 - D}$$

El valor de V_S utilizado para el diseño de los parámetros del convertidor, está relacionado con los valores de tensión en los cuales el generador fotovoltaico, bajo diferentes

condiciones de irradiancia, opera en la región cercana al punto de máxima potencia, este rango corresponde con los valores entre 35 y 39 [V], según la curva PV del generador fotovoltaico con una temperatura de 25 °C. Por otra parte, para la tensión de salida del convertidor, se consideró una tensión que es mayor que la tensión fase pico de la red de baja tensión, $V_{out} = 250$ [V], para garantizar la inyección de potencia a la red eléctrica teniendo en cuenta que el convertidor diseñado se acoplará con un inversor conectado a la red.

Tabla 3 Valores de tensión y ciclo útil para el diseño del convertidor.

V_s	35 [V]
V_{out}	250 [V]
D	0,86

Nota: Los parámetros de la tabla 3, corresponden a los valores considerados para el diseño de los elementos del convertidor.

Inicialmente, para el proceso de diseño, la carga (inversor conectado a la red) es modelada como una resistencia equivalente, teniendo en cuenta los valores de potencia máxima y tensión de salida del convertidor, como se muestra:

$$R = \frac{V_{out}^2}{P_{mpp}} = 89,3 \text{ } [\Omega]$$

La ecuación anterior aplica en este caso de estudio, ya que tiene en cuenta el valor máximo de potencia, $P_{mpp} = 640$ [W], generado bajo una irradiancia de $\frac{1000kW}{m^2}$, temperatura de 25 °C, y se considera la tensión a la salida del convertidor DC-DC (250 [V]).

Para el diseño del inductor, se asume el valor del rizado del inductor como el valor de la corriente máxima a la entrada del convertidor (Hart, 2001), así, el valor del inductor se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$\Delta i_L = \frac{V_S D}{fL} \quad (2.4)$$

Para asumir la operación del circuito en modo de operación continua, se debe garantizar que la corriente en el inductor no sea negativa, para ello se calcula el valor crítico del inductor, L_{min} , cuando la corriente en el inductor mínima es cero. Así, al expresar L_{min} de la ecuación 2.4 en términos del ciclo de trabajo D y la frecuencia de conmutación del convertidor (f), se obtiene el valor mínimo con el cual, el circuito se mantiene en operación continua (para condiciones nominales de potencia).

$$L_{min} \simeq \frac{V_S D}{f \Delta i_L} \quad (2.5)$$

$$L_{min} \simeq \frac{35 * 0,86}{30000 * 18} = 56 [\mu H]$$

El valor inicial de L es calculado incrementando en un 25% el valor de L_{min} previamente calculado, con el fin de garantizar la operación del convertidor en modo continuo (para condiciones nominales de potencia), a pesar de posibles variaciones en los parámetros del circuito:

$$L_1 = 1,25 * L_{min} \quad (2.6)$$

$$L_1 = 70 [\mu H]$$

Sin embargo, al analizar la operación del convertidor ante bajos valores de irradiancia incidente en el generador fotovoltaico, el valor de L_1 calculado en (2.6) lleva a la operación en

modo discontinuo del convertidor DC-DC, dado que la corriente entregada por el generador disminuye con la reducción de la irradiancia. De esta manera, considerando la parte operativa del convertidor y con el fin de garantizar el funcionamiento en modo continuo del convertidor frente a bajos valores de irradiancia incidentes sobre la superficie de los paneles y cambios bruscos de esta variable; se requiere aumentar el valor del inductor por un factor de 15 veces del valor de L calculado, (ver apéndice A.1, allí se encuentran las gráficas de la corriente en el inductor para diferentes valores de inductancia y bajo condiciones bruscas de irradiancia (*Consideración 3*)).

$$L = 15 * L_1 = 1 [mH]$$

Ahora, para calcular el valor del capacitor, se tiene en cuenta la variación de carga del condensador (ΔQ_c), y considerando que $\Delta V_{out} = 2,5 [V]$ (rizado pico a pico igual al 1% del valor de continua de la tensión de salida), se tiene :

$$|\Delta Q_c| = \frac{V_{out}}{R} DT = C \Delta V_{out} \quad (2.7)$$

De la ecuación 2.7 se obtiene el valor de C, así:

$$C_{min} = \frac{V_{out} D}{R f \Delta V_{out}} \quad (2.8)$$

A continuación, se mencionan los valores obtenidos del diseño y las simulaciones del convertidor con diferentes perfiles de irradiancia, los valores mencionados en la tabla 4 hacen referencia a los valores que garantizan el funcionamiento del convertidor DC-DC elevador en modo de operación continuo (Ver apéndice A.1).

Tabla 4 Parámetros del convertidor DC-DC elevador.

V_S	35 [V]
V_{out}	250 [V]
L	1 [mH]
C	2200[μ F]
f	30 [kHz]
C_{in}	1000 [μ F]
R	89 [Ω]

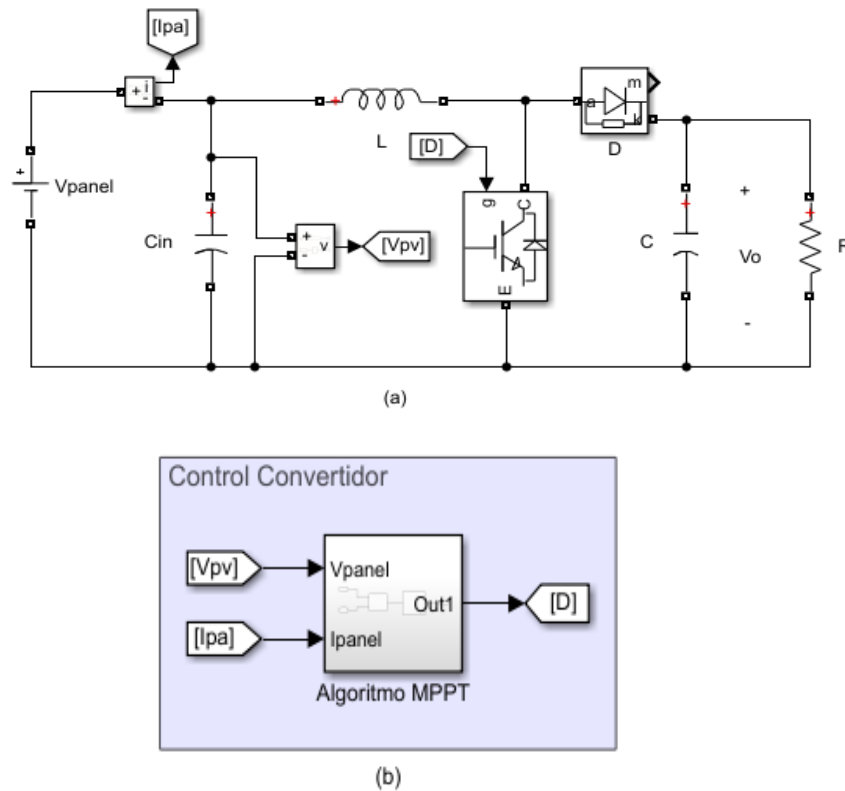
Nota: f corresponde a la frecuencia de conmutación del convertidor considerada para su diseño.

3.2 Diseño y simulación del algoritmo para el seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT)

Para el diseño del sistema de control del convertidor DC-DC, fue necesario considerar el hecho que los generadores fotovoltaicos presentan un punto en el cual entregan su máxima potencia, y que este punto varía según las condiciones de irradiancia y temperatura a las cuales se encuentre expuesto el generador. Por esta condición es imprescindible emplear estrategias de control que busquen el seguimiento de este punto, algoritmos conocidos como MPPT, por sus siglas en inglés *Maximum Power Point Tracker*. Para el desarrollo de esta sección, se tiene la aplicación del algoritmo Perturbar y Observar tradicional (P&O). Para esto, se describe el proceso comparativo del algoritmo de control y luego se muestran los resultados obtenidos en la simulación del algoritmo MPPT.

El entorno de simulación Simulink®, manejado en este trabajo, corresponde a una extensión del software Matlab®. En la figura 8, se encuentra la ilustración del circuito correspondiente al convertidor DC-DC elevador y el algoritmo de control P&O.

Figura 8 Circuito equivalente al convertidor DC-DC elevador y con el algoritmo MPPT.



Nota: a) Circuito equivalente al convertidor DC-DC elevador y b) Diagrama de bloques del algoritmo MPPT.

El algoritmo P&O implementado para controlar el convertidor DC-DC elevador, corresponde a un algoritmo de estructura simple, cuyo funcionamiento se basa en alterar y comparar periódicamente los valores de potencia y tensión entregados por el generador fotovoltaico, con el fin de modificar el ciclo útil de operación del transistor del convertidor, de tal manera que el generador es llevado a operar alrededor del punto de máxima potencia. La comparación de los valores de tensión y potencia, se hacen con valores anteriores, es decir, los valores medidos y/o calculados en la iteración anterior.

Para la simulación de esta etapa de elevación de la tensión del sistema, se utilizó la herramienta Chart de Simulink®, la cual se basa en un flujograma descrito por diagramas de

bloques y condiciones de operación. En la figura 9, se muestra el algoritmo de control utilizado para el seguimiento del punto de máxima potencia.

Como se evidencia en el algoritmo utilizado, (Ver figura 9, tabla 5 y 6), el valor del ciclo útil D del transistor del convertidor está acotado, con el fin de garantizar un buen funcionamiento del circuito.

Tabla 5 Condiciones y características del ciclo útil del transistor.

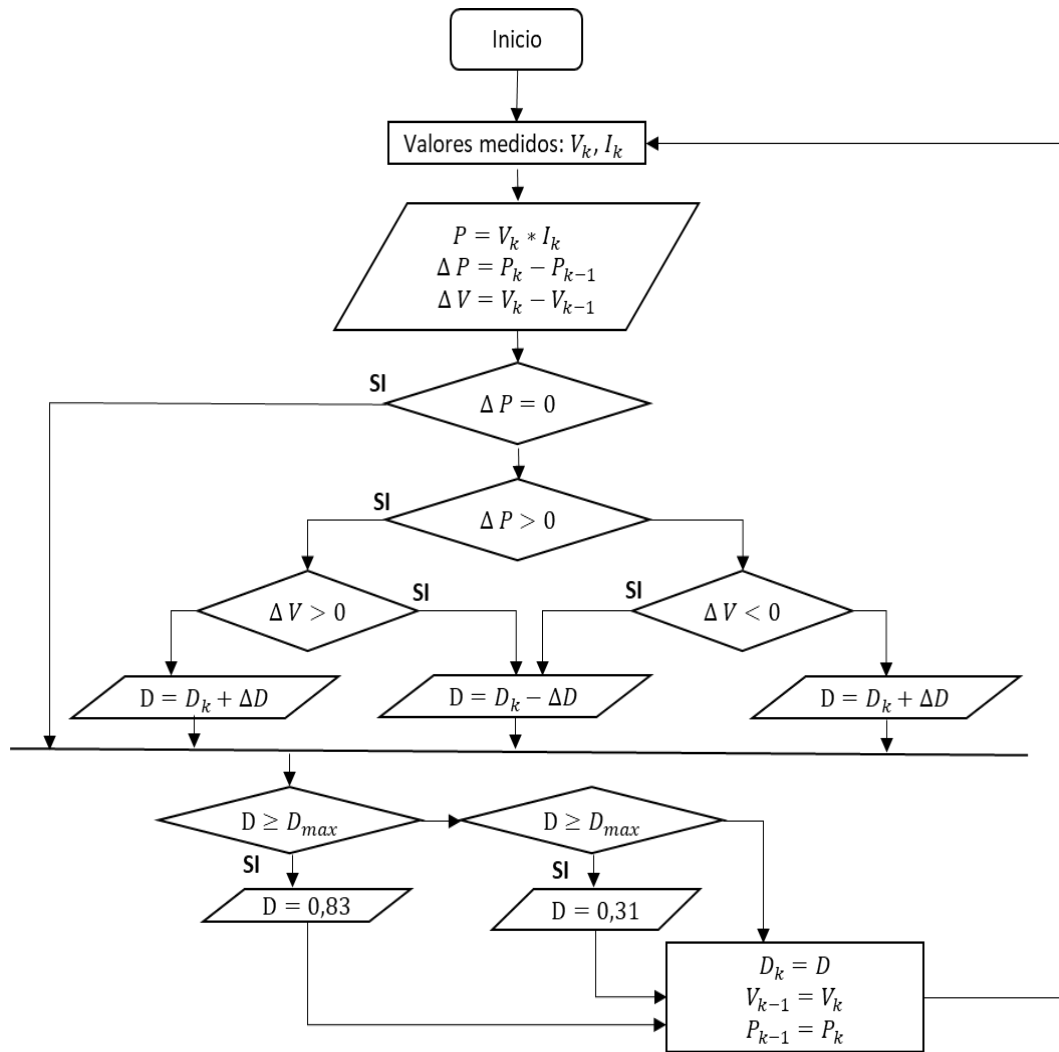
Frecuencia algoritmo MPPT (f_{MPPT})	1,25 [kHz]
D_{max}	0,83
D_{min}	0,3
ΔD	0,003

A continuación, se muestra el valor de los parámetros iniciales del algoritmo.

Tabla 6 Parámetros iniciales del algoritmo P&O

$f_{portadora}$	30 [kHz]
$D_{k, inicial}$	0,7
$P_{k-1} inicial$	0 [W]
$V_{k-1} inicial$	0 [V]

Figura 9 Algoritmo Perturbar y Observar (P&O) con rango del ciclo útil D .



Nota: $f_{portadora}$ corresponde a la frecuencia de la señal diente de sierra para la generación de pulsos PWM del transistor propio del convertidor DC-DC.

Una vez el ciclo útil del convertidor es calculado, este se sintetiza mediante la técnica PWM explicada a continuación.

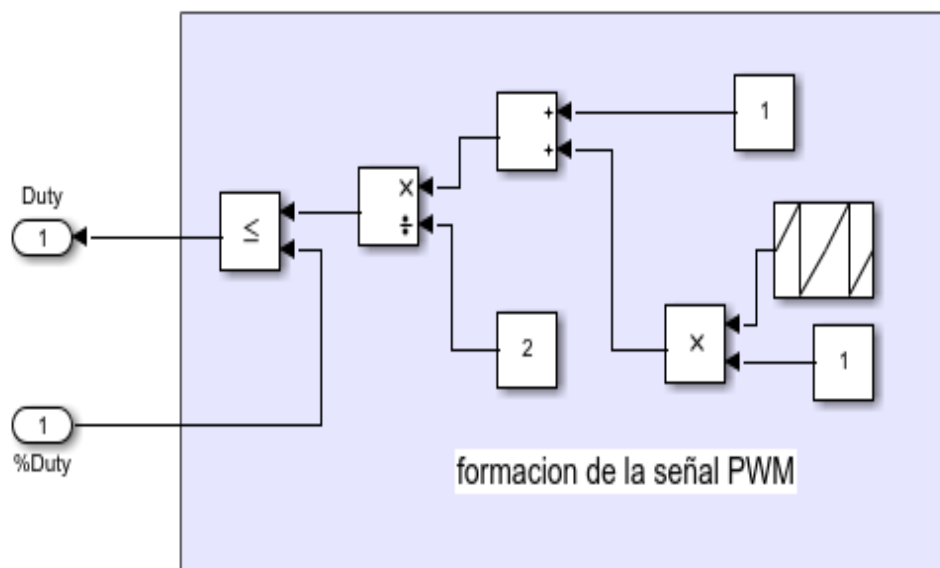
3.3 Modulación por ancho de Pulsos (PWM) para el convertidor DC-DC elevador

La modulación PWM (por sus siglas en inglés de *pulse-width modulation*) es una técnica utilizada en la electrónica de potencia por su fácil implementación en sistemas de control. El funcionamiento de esta modulación consiste en comparar una señal de referencia, y

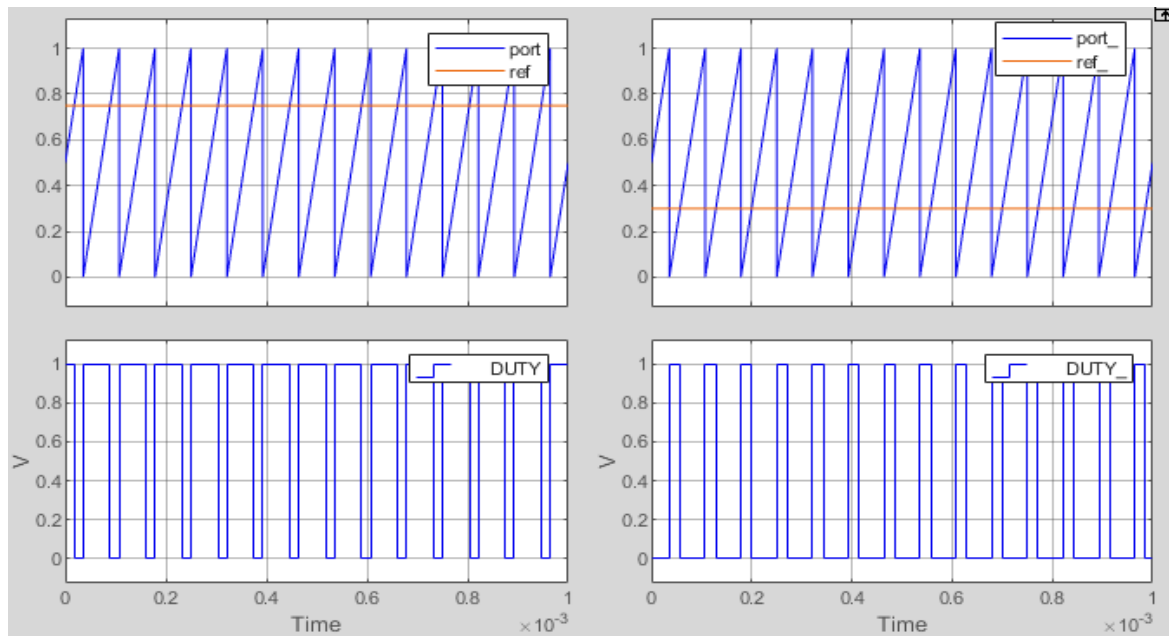
una señal portadora. En este trabajo, la portadora corresponde a una señal diente de sierra, mientras que la señal de referencia depende de la decisión de control proporcionada por el algoritmo Perturbar y Observar (P&O).

En la figura 10 se encuentra el diagrama de bloques que realiza la modulación PWM para el convertidor elevador, y en la figura 11 se pueden observar las gráficas correspondientes a la generación de los pulsos de activación del transistor para el circuito, obteniendo un estado de activación del transistor cuando la señal de referencia es mayor a la señal portadora de alta frecuencia y, por otro lado, el transistor se desactiva cuando la referencia es menor a la portadora. Los estados de activación y desactivación del transistor corresponden al ciclo útil del funcionamiento del dispositivo de conmutación empleado.

Figura 10 Esquema de generación de la señal PWM para el convertidor DC-DC.



Nota: La entrada "%Duty" corresponde al valor de la señal de referencia que será comparada con la señal portadora.

Figura 11 Señales PWM del convertidor elevador.

Nota: las gráficas superiores corresponden a la comparación de la señal portadora (en azul) y la señal de referencia (en rojo) para obtener un valor para el ciclo útil; las figuras de la izquierda se presentan para el caso de un ciclo útil del 75% mientras que las figuras de la derecha representan el caso de un ciclo útil del 25%.

Los resultados del funcionamiento del convertidor DC-DC se encuentran con más detalle en el apéndice A.1; en este apartado se encuentra un breve análisis del sistema diseñado frente al comportamiento del algoritmo MPPT y en general del sistema conectado a una carga resistiva a la salida.

4 Diseño y control del inversor puente H en cascada de tres niveles y del filtro de conexión a la red.

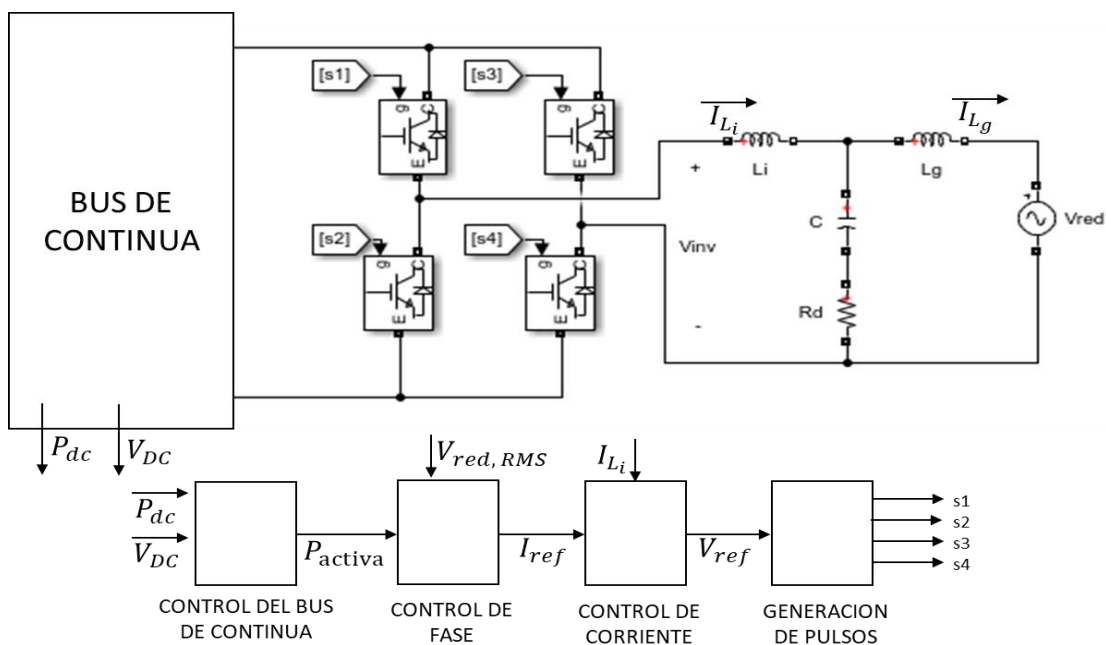
En esta sección se presenta el diseño del inversor de potencia, los cálculos del filtro de conexión a la red, y el desarrollo de las estrategias de control del inversor las cuales incluyen:

control de la corriente entregada por el inversor, generación de los pulsos de conmutación mediante la técnica PWM Unipolar, y la generación de las señales de referencia (sincronización con la red o control de fase, control de la tensión del bus de continua y potencia activa).

4.1 Inversor puente H en cascada de tres niveles

En la figura 12, mostrada a continuación, se puede observar un diagrama de bloques donde se presentan, de una forma general por fase, los mecanismos de control para la inyección de potencia y funcionamiento del inversor de potencia acoplado a la red a través de un filtro LCL de conexión a la red.

Figura 12 Diagrama de bloques por fase del inversor en topología puente H de tres niveles y sus estrategias de control para inyección de potencia a la red.



De la figura 12 mostrada anteriormente, se consideran los parámetros de la tabla 7, para el diseño y desarrollo del estudio del inversor de potencia, donde:

$P_{nominal}$: es la potencia activa máxima a la entrada del inversor de potencia,

V_{red} : es la tensión RMS de la red de baja tensión,

V_{DC} : es la tensión en DC de entrada del inversor de potencia,

f_{sw} : es la frecuencia de conmutación de los IGBT del inversor,

ω : es la frecuencia angular de la red de baja tensión y

f_{red} : es la frecuencia de la red de baja tensión.

Tabla 7 Parámetros para el diseño y control del inversor en puente H de tres niveles.

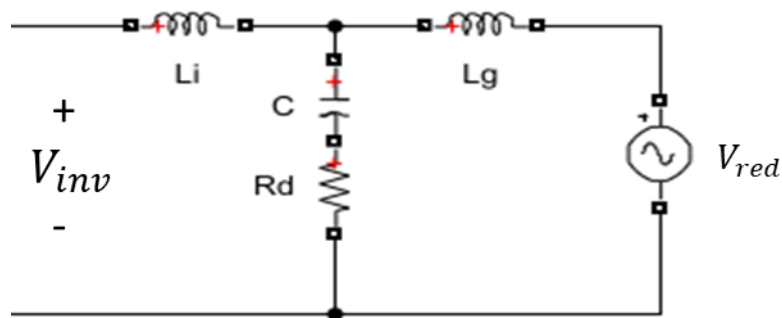
$P_{nominal}$	640 [W]
V_{red}	120 [V_{rms}]
V_{DC}	250 [V]
f_{sw}	12 [kHz]
ω	$120\pi \left[\frac{rad}{s} \right]$
f_{red}	60 [Hz]

4.2 Diseño del filtro LCL de conexión a la red.

Como se ha mencionado en capítulos anteriores, para mejorar la calidad de las señales de tensión y corriente del sistema para la posterior conexión a la red de baja tensión, y con el fin de obtener una notable reducción de la distorsión armónica en el sistema, es necesaria la implementación de un filtro LCL de conexión a la red; el filtro fue diseñado con una resistencia de amortiguamiento en serie con el capacitor del filtro para reducir el pico de la frecuencia de resonancia del circuito.

A continuación, se describen las condiciones y parámetros para el diseño del filtro de conexión tomando como referencia la siguiente figura.

Figura 13 Circuito equivalente para el diseño del filtro LCL.



Cossoli, Cáceres, Vera, Firman y Busso (2018) desarrollan los cálculos para el diseño del filtro de la siguiente manera:

$$Z_{base} = \frac{V_{red}^2}{P_{nominal}} \quad (3.1)$$

Donde Z_{base} , corresponde con la impedancia base vista desde la salida del inversor de potencia.

Con base a los parámetros anteriores, se puede calcular C_{base} , como se observa a continuación:

$$C_{base} = \frac{1}{\omega Z_{base}} \quad (3.2)$$

Donde ω es la frecuencia angular del sistema. Por condiciones de diseño, se debe considerar que la potencia reactiva absorbida por la capacitancia calculada no exceda el 5% del valor de potencia nominal entregada por el inversor, por tanto, de la ecuación 3.2 se obtiene la condición mencionada anteriormente, así:

$$C = 0.05 * C_{base} \quad (3.3)$$

Se plantea un rizado pico a pico en la corriente del inversor del 20%, se tiene que:

$$\Delta I_{max} = 0.2 * \frac{\sqrt{2} P_{nominal}}{V_{red}} \quad (3.4)$$

Así, definido ΔI_{max} , se puede calcular el valor de la inductancia del lado del inversor L_i , como se muestra en la siguiente ecuación:

$$L_i = \frac{V_{DC}}{6 f_{sw} \Delta I_{max}} \quad (3.5)$$

El cálculo de la inductancia de la red, corresponde a una proporción $r = 1$, tal que se obtiene el mismo valor de la inductancia del lado del inversor:

$$L_g = r L_i \quad (3.6)$$

Finalmente, como método de verificación con todos los componentes hallados, se debe verificar que la frecuencia de resonancia del filtro se encuentre dentro del rango:

$$10 f < f_{res} < 0.5 f_{sw}$$

Donde f es la frecuencia fundamental de la corriente inyectada. El cálculo de la frecuencia de resonancia se da por:

$$\omega_{res} = 2\pi f_{res} = \sqrt{\frac{L_i + L_g}{L_i L_g C}} \quad (3.7)$$

En resumen, en la tabla 8 se encuentran los valores comerciales para el filtro diseñado, teniendo en cuenta que la resistencia de amortiguamiento se calculó a través del diagrama de bode del filtro, donde se asignan distintos valores de R_d hasta lograr la atenuación del pico de resonancia.

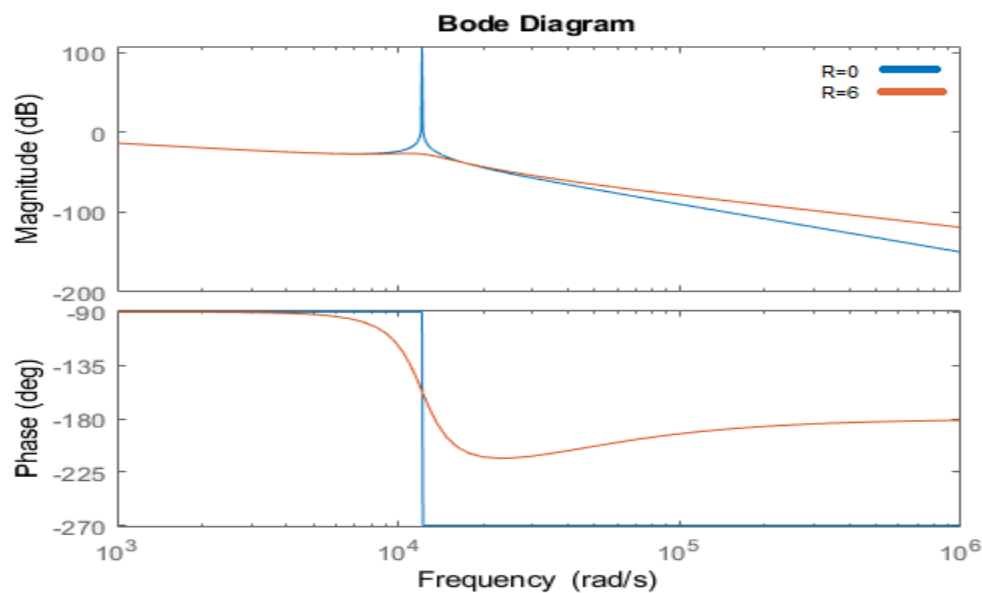
Tabla 8 Valores de los componentes del filtro LCL.

$L_i = L_g$	2,4 [mH]
C	6,8 [μ F]
R_d	6 [Ω]

En la figura 14, se puede observar la reducción del pico de la resonancia, utilizando la resistencia R_d escogida para el filtro LCL. La función de transferencia del filtro diseñado se muestra a continuación:

$$H(s) = \frac{I_{L_g}(s)}{V_{inv}(s)} = \frac{RCs + 1}{L_i L_g C s^3 + RC(L_i + L_g)s^2 + (L_i + L_g)s} \quad (3.8)$$

Figura 14 Reducción del pico de la resonancia del circuito con y sin resistencia.



4.3 Sistema de control

El sistema de control del inversor, está compuesto por los siguientes subsistemas:

- Modulación PWM
- Controlador de corriente
- Generación de las corrientes de referencia

A continuación, se describen los algoritmos empleados en este trabajo para cada subsistema.

4.3.1 Modulación PWM para el inversor en topología puente H en cascada de tres niveles.

Las dos estrategias de control comúnmente utilizadas para la modulación del inversor de puente H, son la modulación Unipolar y Bipolar, cuya diferencia entre estos dos tipos corresponde al número de señales portadoras y a los niveles de tensión generados a la salida del inversor. En seguida se describen más características de las estrategias de modulación mencionadas:

- La modulación bipolar funciona comparando una señal de referencia sinusoidal (V_m) y una señal portadora triangular (V_{cr}), de tal forma que cuando la señal de referencia es mayor a la señal portadora, se genera a la salida del inversor un valor de $V_{inv} = V_{DC}$, y cuando la señal de referencia es menor a la portadora, se obtiene un valor de $V_{inv} = -V_{DC}$, obteniendo como resultado dos valores de tensión a la salida. Considerando que, para el funcionamiento de esta topología de inversor, se define que el estado de uno de los dos

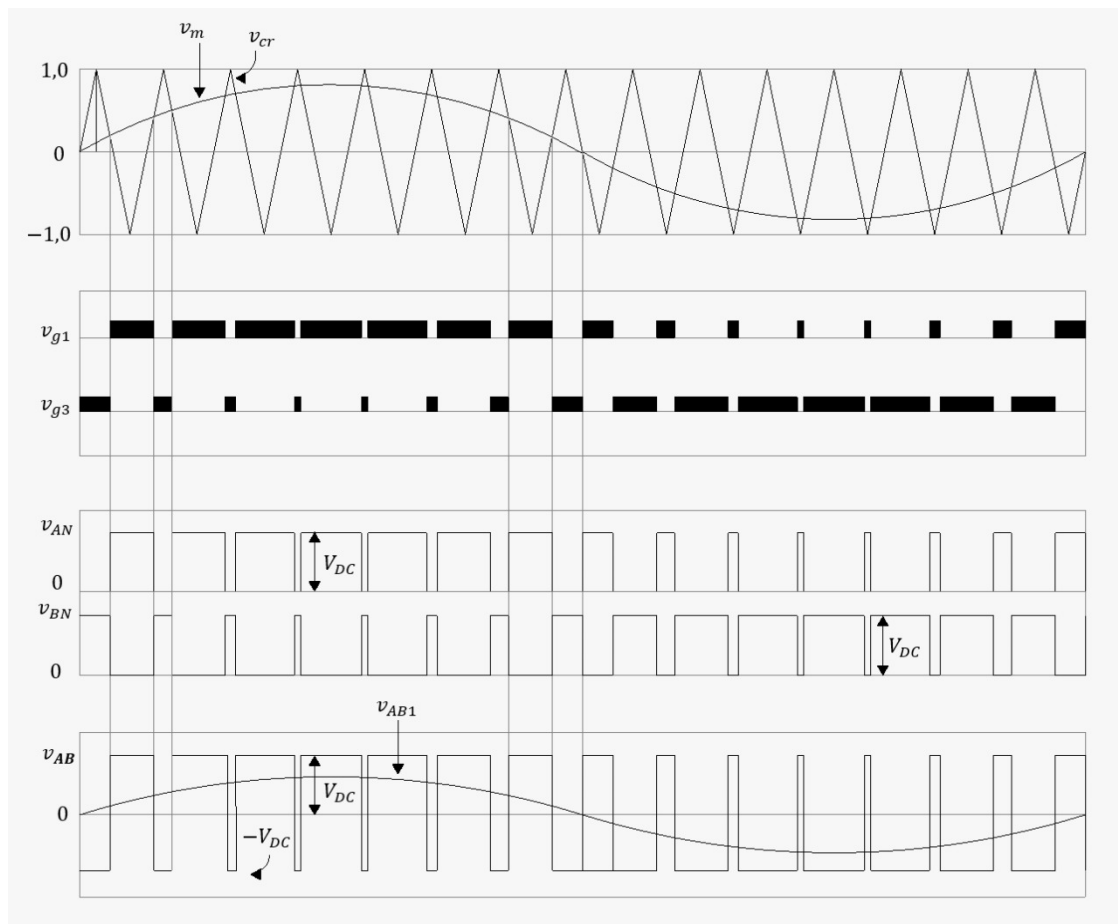
IGBT de una rama, es el complementario del otro de la misma rama, dicho de otra forma, cuando un interruptor está activado, el otro debe estar desactivado; por lo tanto, las siguientes condiciones definen el estado de conducción de los IGBT del inversor y el valor de tensión a la salida del inversor:

$$S_1 \text{ y } S_4 \text{ conducen cuando } v_m \geq v_{cr} \Rightarrow V_{inv} = V_{DC}$$

$$S_2 \text{ y } S_3 \text{ conducen cuando } v_m < v_{cr} \Rightarrow V_{inv} = -V_{DC}$$

En la figura 15 se puede observar el proceso descrito previamente.

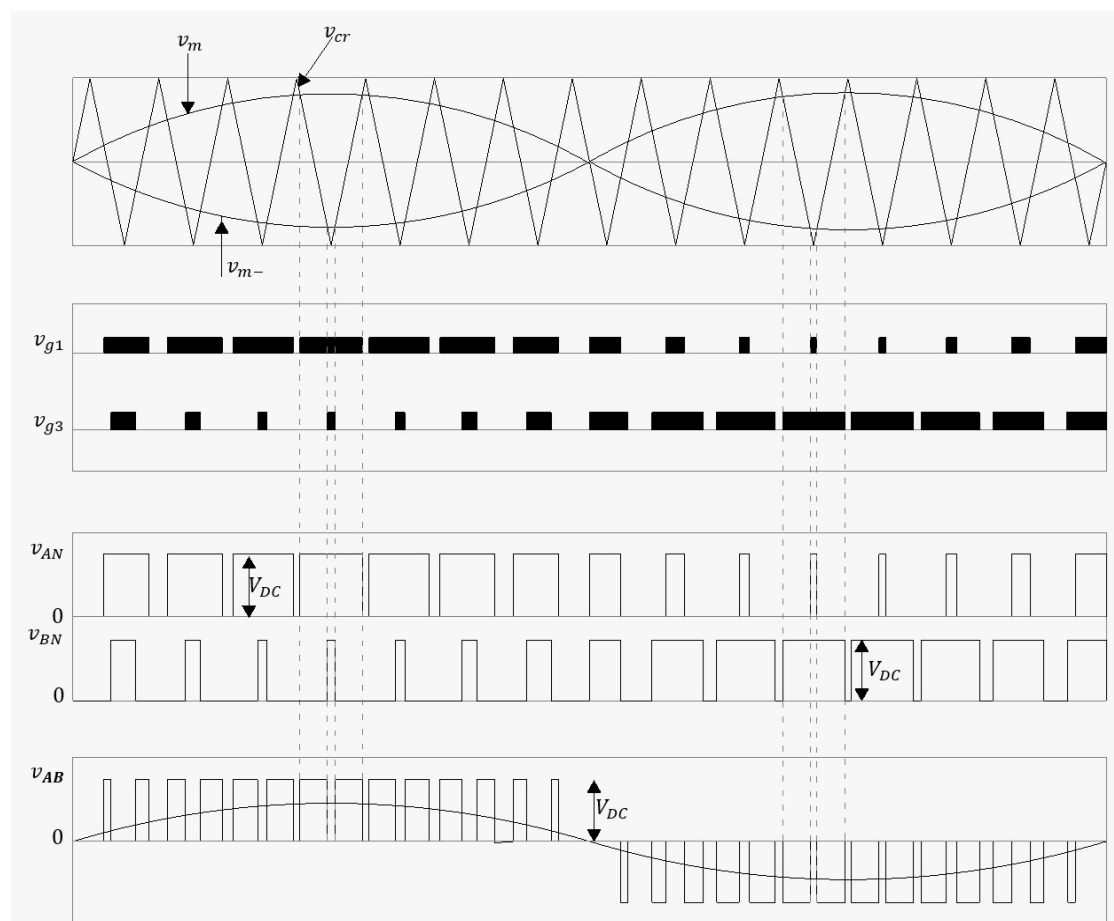
Figura 15 Forma de onda de un PWM bipolar.



Nota: Adaptado de Namboodiri, A., & Wani, H. S. (2014). Unipolar and bipolar PWM inverter.

- La modulación unipolar se caracteriza por la existencia de una señal portadora triangular y de dos señales de referencia, ambas de igual amplitud y frecuencia, la diferencia de una señal de referencia con la otra corresponde a un desfase de 180° o π [rad], es decir, dada una señal de referencia, la segunda señal es el complemento de la primera, de esta manera se crean dos señales diferentes, destinadas al control de las ramas del inversor, dicho de otra manera, una señal de referencia controla S1 y S2, mientras que la otra señal controla S3 y S4. Las gráficas presentadas a continuación, muestran el comportamiento de las señales de activación de los interruptores por cada rama del inversor de potencia basadas en la modulación unipolar PWM.

Figura 16 Forma de onda de un PWM unipolar.



Nota: Adaptado de Namboodiri, A., & Wani, H. S. (2014). Unipolar and bipolar PWM inverter. International Journal for Innovative Research in Science & Technology, 1(7), 237-243.

A continuación, se muestran los niveles de tensión a la salida del inversor cuando se encuentran activados cada combinación de los interruptores.

$$S_1 \text{ conduce cuando } v_m \geq v_{cr}$$

$$S_2 \text{ conduce cuando } v_m < v_{cr}$$

$$S_3 \text{ conduce cuando } v_{m-} \geq v_{cr}$$

$$S_4 \text{ conduce cuando } v_{m-} < v_{cr}$$

Con el análisis de la figura 16 de las formas de onda de la modulación PWM unipolar y las condiciones de conducción de cada uno de los IGBT, se tiene que los interruptores se activan según las condiciones de la tabla 9, donde también se pueden observar los tres niveles obtenidos a la salida del inversor de potencia $V_{inv}(t)$.

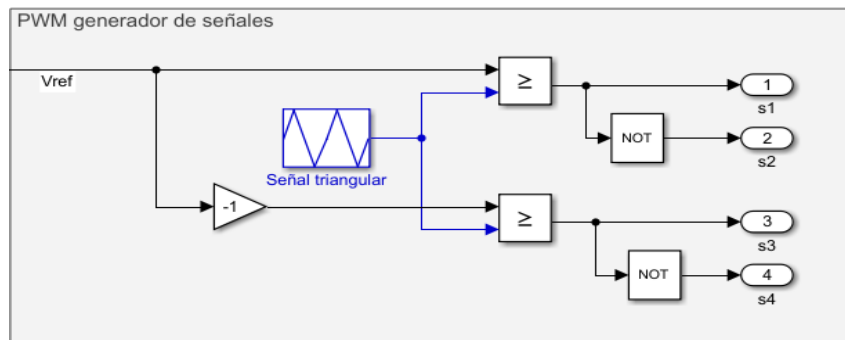
Tabla 9 Tensiones de salida obtenidas a través de la modulación unipolar partiendo del estado de los dispositivos de conmutación del inversor.

Momento	S1	S2	S3	S4	$V_{inv}(t)$
1	ON	OFF	OFF	ON	V_{DC}
2	OFF	ON	ON	OFF	$-V_{DC}$
3	ON	OFF	ON	OFF	0
4	OFF	ON	OFF	ON	0

Almeida, D. (2018). Caracterización de Inversores multinivel tipo puente-H en cascada. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Universidad Industrial de Santander.

A continuación, se muestra el diagrama de bloques utilizado para la implementación de la técnica PWM unipolar, vale la pena mencionar que es la modulación elegida para la conmutación de los elementos del inversor.

Figura 17 Esquema empleado para la modulación PMW Unipolar para el inversor CHB en topología puente H de tres niveles.

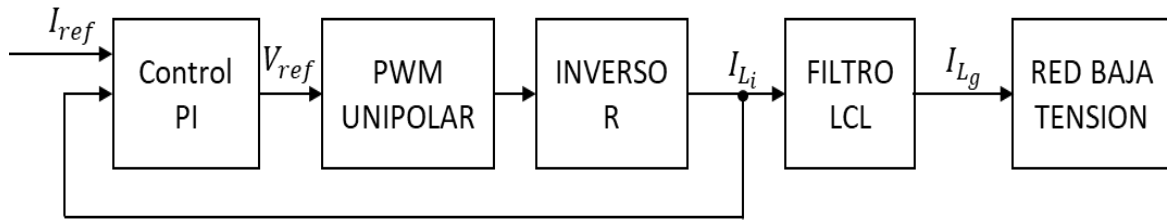


4.3.2 Control de corriente.

Para el caso de la inyección de potencia activa a la red de baja tensión, es necesario ejercer un control sobre las corrientes inyectadas, para ello, se utilizan estrategias de control con el objetivo de disminuir la señal del error obtenido de la diferencia entre las señales objetivo (la corriente de referencia) y la señal de corriente a la salida del inversor.

En este caso, la estrategia de control utilizada consiste en un control PI, donde lo que se busca, a través de este método de control, es reducir considerablemente el valor de la señal error, hasta un valor cercano o igual a cero. El diagrama de control empleado se muestra de forma general en la figura 18. Tal como se observa en esta figura, la señal de salida del control PI corresponde a la señal de tensión de referencia (V_{ref}) la cual es sintetizada empleando la técnica PWM unipolar, para generar los pulsos de conmutación del inversor.

Figura 18 Esquema de bloques general del control de corriente utilizado.



El desarrollo del control PI, se rige por la función de transferencia $G_1(s)$:

$$G_1(s) = K_p + \frac{K_i}{s}$$

Donde K_p es la ganancia proporcional del controlador, y K_i es la ganancia integral del controlador. El valor de las ganancias del control depende exclusivamente del comportamiento del sistema descrito por la señal de transferencia del sistema a controlar. El cálculo de estas ganancias se realizó a través del segundo método de Ziegler-Nichols (Ogata, 2010). El método está basado en la ganancia crítica K_{cri} y el periodo crítico u oscilación sostenida P_{cri} . Para la obtención de las constantes se tienen en cuenta las consideraciones de la tabla 10, donde $K_i = K_p/T_i$.

Tabla 10 Reglas de sintonía del segundo método de Ziegler-Nichols.

Controlador	K_p	T_i
PI	$0,45K_{cri}$	$\frac{P_{cri}}{1,2}$

Teniendo en cuenta que el sistema tiene un integrador, entonces se supone $T_i = \infty$, $G_c(s) = K_p$, y teniendo en cuenta la función de transferencia del filtro LCL, es decir la ecuación 3.8, se tiene la siguiente función de transferencia aplicada para la búsqueda de las ganancias proporcional e integral:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G_s(s)}{\frac{1}{H(s)} + G_s(s)}$$

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{K_p + (RCs + 1)}{L_i L_g C s^3 + RC(L_i + L_g)s^2 + ((L_i + L_g) + K_p RC)s + K_p} \quad (3.9)$$

El valor de K_p , es obtenido a través del criterio de estabilidad de Routh Hurwitz, analizando los polos de la función de transferencia en estudio, así:

Tabla 11 Análisis del sistema según los criterios de Routh Hurwitz.

s^3	$L_i L_g C$	$(L_i + L_g) + K_p RC$
s^2	$RC(L_i + L_g)$	K_p
s^1	$\frac{RC(L_i + L_g)((L_i + L_g) + K_p RC) - K_p L_i L_g C}{RC(L_i + L_g)}$	-
s^0	K_p	-

Para determinar la ganancia crítica K_{cri} , es necesario la ecuación perteneciente al término s^1 (ver tabla 11) igualado a cero, de tal forma que al despejar K_p se tiene lo siguiente:

$$K_{cri} = \frac{-RC(L_i + L_g)^2}{(RC)^2(L_i + L_g) - L_i L_g C}$$

$$K_{cri} = 24,0002$$

Entonces, teniendo en cuenta la ganancia crítica hallada anteriormente, se analizan los polos de la función de transferencia, y reemplazando $s = j\omega$, se obtiene el valor de la frecuencia de oscilación mantenida ω_{cri} ,

$$L_i L_g C (j\omega)^3 + RC(L_i + L_g)(j\omega)^2 + ((L_i + L_g) + K_{cri} RC)(j\omega) + K_{cri} = 0$$

$$\omega = \omega_{cri} = 8260,7 \text{ [rad/s]}$$

Con el valor de ω_{cri} , se procede a calcular el valor del periodo de oscilación mantenida P_{cri} y haciendo uso de las fórmulas mencionadas en reglas de sintonía de segundo método de Ziegler-Nichols, se pueden calcular los valores de las ganancias proporcional K_p e integral K_i de un controlador PI, como se muestra enseguida:

$$P_{cri} = \frac{2\pi}{\omega_{cri}} = 760,62 \text{ [\mu s]}$$

$$K_p = 0,45 K_{cri} = 10,8$$

$$T_i = \frac{P_{cri}}{1,2} = 633,85 \text{ [\mu s]}$$

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} = 17039$$

Teniendo en cuenta las relaciones anteriores, se obtienen todos los parámetros calculados para el control PI de corriente en la siguiente tabla:

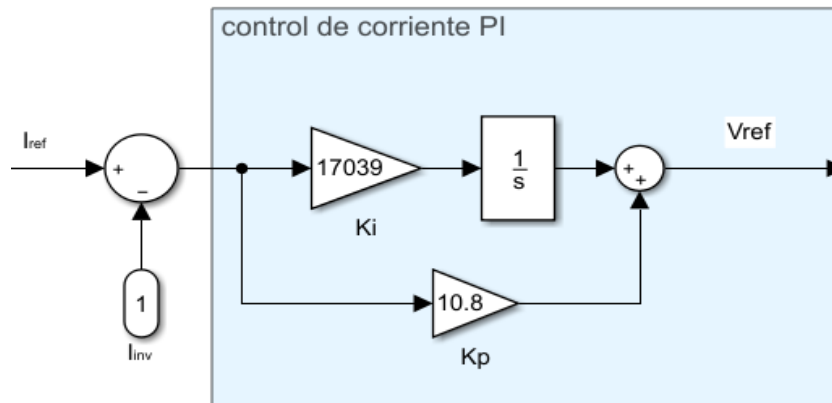
Tabla 12 Ganancias del control PI para el seguimiento de corrientes de referencia.

K_p	10,8
K_i	17039

El esquema de control utilizado en Simulink® para realizar el control de la corriente a inyectar en la red, se muestra en la figura 19, en ella se pueden observar las ganancias del control PI encontradas anteriormente, donde V_{ref} corresponde a la tensión de referencia por fase para generar los pulsos de conmutación de los IGBT del inversor, pues este valor de tensión corresponde a la señal de referencia para la modulación PWM Unipolar; I_{inv} equivale

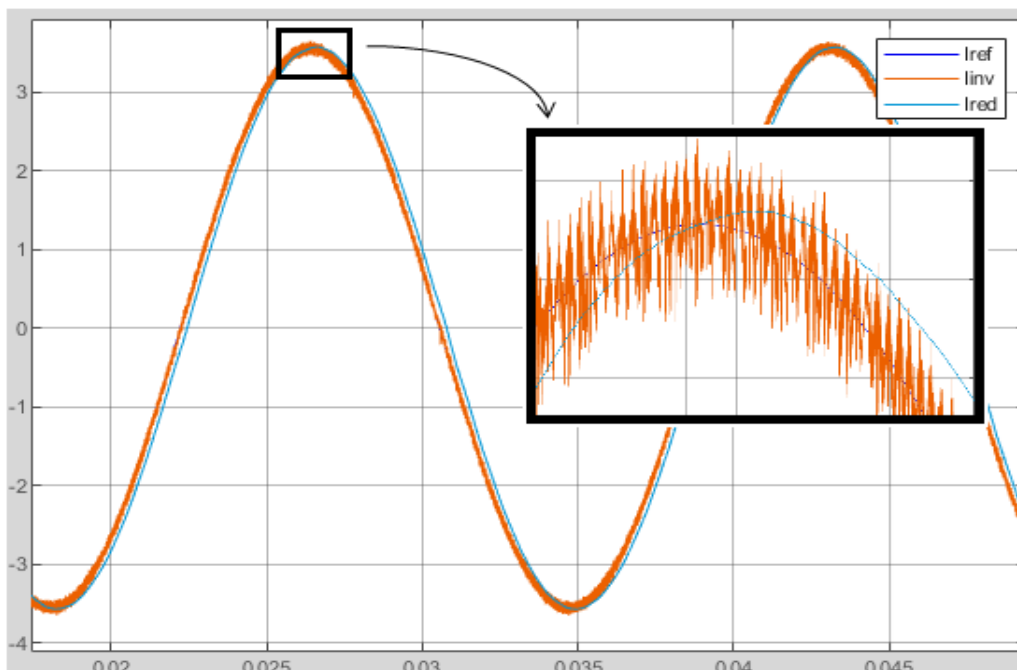
a la corriente medida en la salida del inversor CHB, y por último, I_{ref} es la corriente de referencia, cuyo valor es calculado, y depende de la potencia que se inyecta a la misma red.

Figura 19 Esquema para el control PI para el seguimiento de corrientes de referencia.



En definitiva, utilizando el control PI, se obtiene el seguimiento de corrientes de referencia como se puede observar en la figura 20.

Figura 20 Forma de onda resultante para la corriente de referencia empleando un control PI.



Nota: I_{ref} es la corriente de referencia; I_{inv} es la corriente a la salida del inversor; I_{red} es la corriente inyectada a la red de baja tensión.

4.3.3 Generación de las señales de referencia.

La generación de las señales de referencia se basa en: un control de seguimiento de fase (sincronización con la red), la entrega de potencia activa a la red por parte del generador fotovoltaico, y el control de la tensión del bus de continua del inversor. En esta parte, se desarrolla una estrategia para sincronizar las señales del sistema de generación con la red de baja tensión, asumiendo tensiones balanceadas y sin distorsión armónica en el punto de acoplamiento común.

Con el fin de asegurar el suministro adecuado de la potencia activa entregada por el convertidor a la red, se tiene en cuenta que la corriente de referencia es definida a partir de la potencia activa que se quiere inyectar a la red.

En primera medida, para determinar la potencia activa a inyectar a la red, se parte de la potencia generada por el arreglo fotovoltaico (P_{pv}), a la cual se le resta la potencia (P_{dc}) requerida para mantener la tensión del bus de continua del inversor en un valor de referencia establecido ($V_{dc,ref}$). De esta manera, la potencia activa a entregar a la red se halla de la siguiente forma:

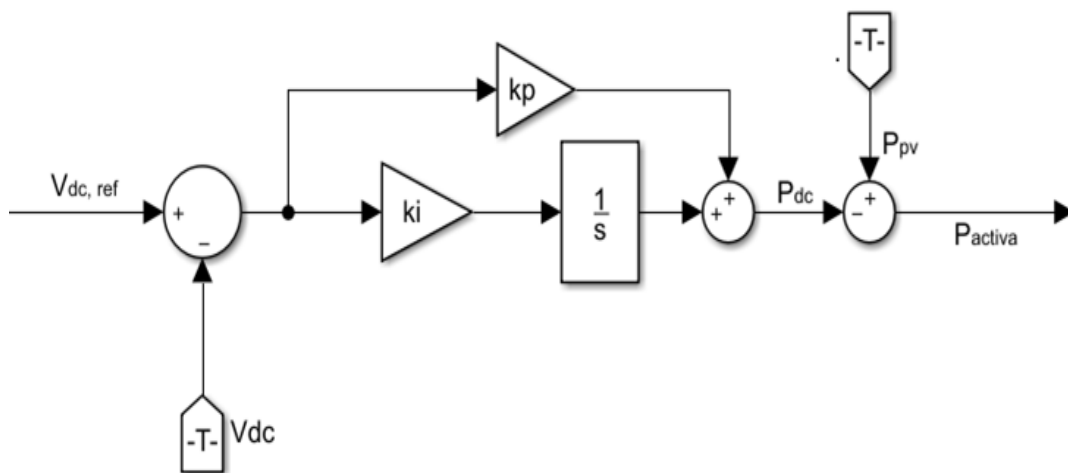
$$P_{activa} = P_{pv} - P_{dc}$$

P_{pv} : Potencia activa instantánea que entrega el generador fotovoltaico.

P_{dc} : Potencia requerida para mantener la tensión del condensador del lado de continua en el valor de referencia $V_{dc,ref}$.

La potencia P_{dc} es calculada mediante una estrategia de control PI (Castellanos & Quiñones, 2013). A continuación, se presenta el diagrama de bloques utilizado para la simulación de este control.

Figura 21 Esquema de control PI del bus de continua del inversor de potencia.



La figura anterior corresponde a la representación en diagramas de bloques de la siguiente ecuación que define al regulador PI:

$$P_{dc} = K_p(V_{dc,ref} - V_{dc}) + K_i \int_0^t (V_{dc,ref} - V_{dc})dt$$

Donde:

$V_{dc,ref}$: 250 V

V_{dc} : Tensión en el condensador del lado de continua del inversor.

K_p : Ganancia proporcional

T_i : Tiempo integral que representa la cantidad de veces que se está repitiendo la acción proporcional.

Para la selección de los valores de las constantes K_p y T_i , se debe tener en cuenta el sistema y el diseño que se tenga, para este caso se escogió: $K_p=15$, $T_i= 1$.

Establecida la potencia activa, P_{activa} a inyectar a la red, se parte de las siguientes definiciones:

$$P_{activa} = 3 V_{red} I_{rms}$$

$$I_{pico} = \sqrt{2} I_{rms}$$

Donde V_{red} e I_{rms} corresponden los valores RMS de la tensión de fase de la red en el punto de acoplamiento común y corriente inyectada a la red, respectivamente.

Con las ecuaciones anteriores se tiene la corriente pico por fase a inyectar, así:

$$I_{pico} = \frac{\sqrt{2} P_{activa}}{3 V_{red}}$$

Para sincronizar las corrientes inyectadas con las tensiones de la red, se emplea un vector unitario de tensión como el mostrado en la siguiente ecuación:

$$V_{unit,i} = \frac{v_{red,i}(t)}{\sqrt{2}(V_{red})^2}$$

Donde el subíndice i hace referencia a cada una de las fases que se estén analizando. Entonces la relación de la corriente con la potencia a suministrar en el sistema sigue la ecuación:

$$i_{ref,i}(t) = \frac{P_{activa} v_{red,i}(t)}{3 (V_{red})^2}$$

Con las corrientes de referencia calculadas para cada una de las fases del sistema, como se mostró en la ecuación anterior, se obtiene un control de fase de la corriente, según la P_{activa} a inyectar a la red.

Al considerar un sistema trifásico balanceado y sin distorsión armónica, es válido realizar la siguiente igualdad al realizar la simulación, para determinar el valor RMS de la tensión de fase de la red.

$$3(V_{red})^2 = V_{an}^2 + V_{bn}^2 + V_{cn}^2$$

5 Análisis de la interconexión del sistema y la red de baja tensión

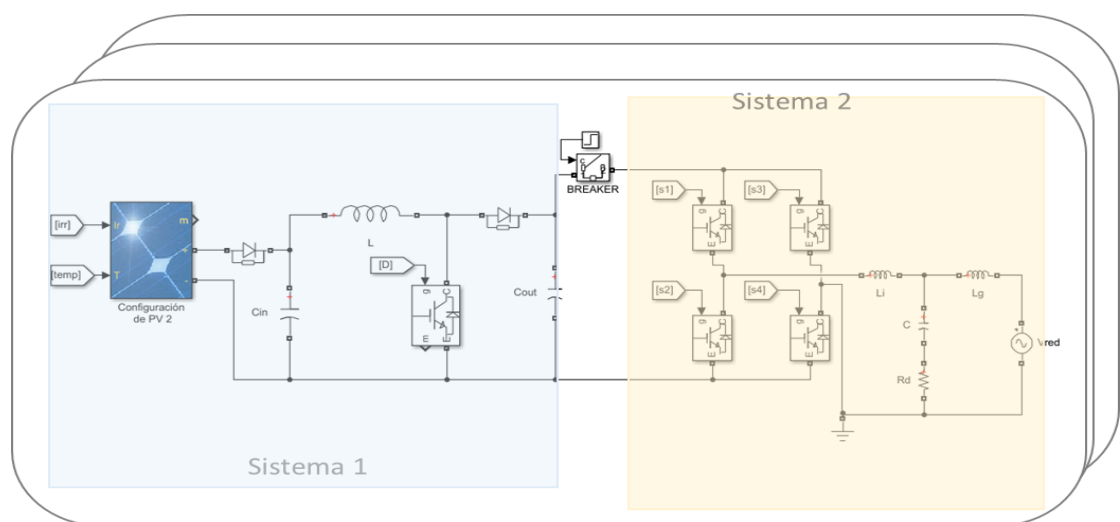
El presente capítulo tiene como objetivo verificar el funcionamiento del sistema eléctrico acoplado, dicho sistema corresponde a la interconexión entre el sistema Generador-Convertidor DC-DC (Sistema 1), diseñado y simulado en el capítulo 3, y el sistema Inversor-filtro LCL-Red de baja tensión (Sistema 2), estudiado y desarrollado en el capítulo 4.

Para realizar la interconexión del sistema de generación de energía fotovoltaica en general, fue necesario realizar algunos ajustes con respecto a las simulaciones de cada sistema por separado, modificaciones que corresponden a cambios operativos resultantes de la transición de la etapa de diseño de los sistemas por separado, a la etapa de acoplamiento de sistemas, las modificaciones realizadas se mencionan en seguida:

1. Se elimina la resistencia R , ubicada a la salida del convertidor DC-DC elevador.
2. Se elimina la fuente de DC a la entrada del inversor de potencia; esta fuente se consideró con un valor de 250 [V], valor que corresponde a la tensión objetivo de salida del convertidor.

En la figura 22 se encuentra la representación monofásica correspondiente al sistema interconectado.

Figura 22 Sistema de generación fotovoltaico conectado a una red de baja tensión.



Nota: Para la conexión entre los sistemas 1 y 2 se implementa un interruptor de potencia o *breaker*, este último elemento es activado tiempo después de considerar la estabilidad del sistema, es decir cuando la tensión en el capacitor C_{out} se encuentre en un valor igual o superior a su valor de referencia, que fue de 250 [V].

Es necesario advertir al lector, acerca del análisis y descripción de la operación del sistema ya interconectado, para ello se obtienen las siguientes consideraciones de operación del sistema:

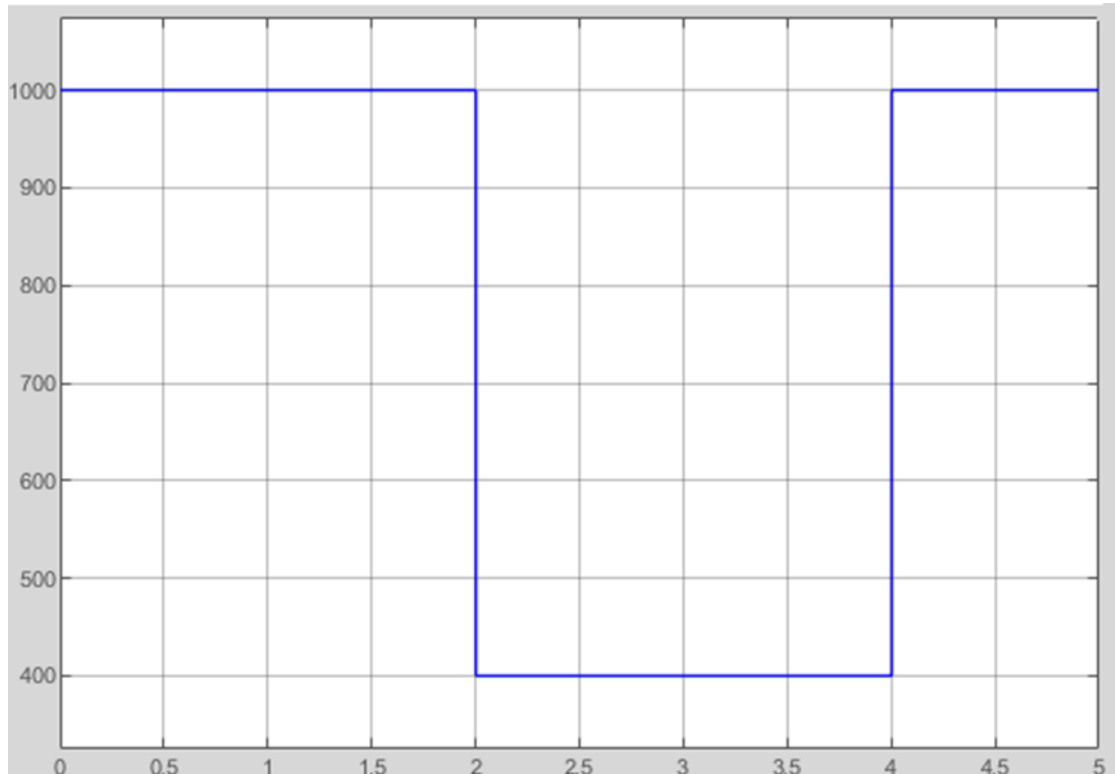
- El tiempo para la interconexión del sistema se define en 1,7 segundos, buscando obtener una tensión en el capacitor C_{out} superior a los 250 V, a menos que se indique lo contrario, es decir que el interruptor de potencia se cierra para la conexión de los sistemas al paso del tiempo considerado en este ítem.
- Para verificar la operación del sistema interconectado, se evalúa el seguimiento del punto de máxima potencia del panel, la entrega de potencia a la red, y también el seguimiento de las corrientes de referencia, por consiguiente, se obtienen los resultados mostrados para el caso de estudio descrito a continuación, donde solo se consideran cambios de irradiancia, mientras que la temperatura del panel se establece constante en 28°C.

En la sección 5.1 se especifica el caso de estudio considerado para el desarrollo del trabajo de grado

5.1 Caso 1:

Para este caso de estudio, se tienen 3 momentos considerados para el cambio de irradiancia. En la figura 23 se presenta la variación en el tiempo de la irradiancia a la cual se expone el generador fotovoltaico.

Figura 23 Irradiancia incidente en los generadores fotovoltaicos para el caso 1.

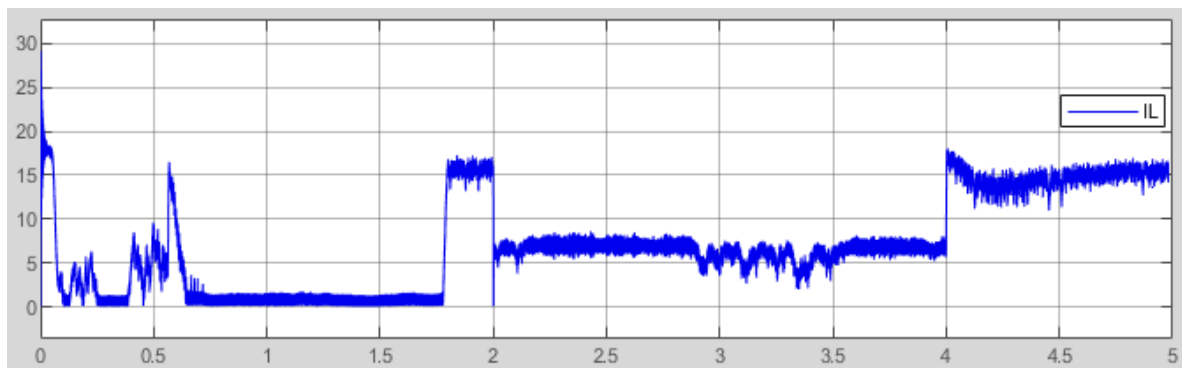
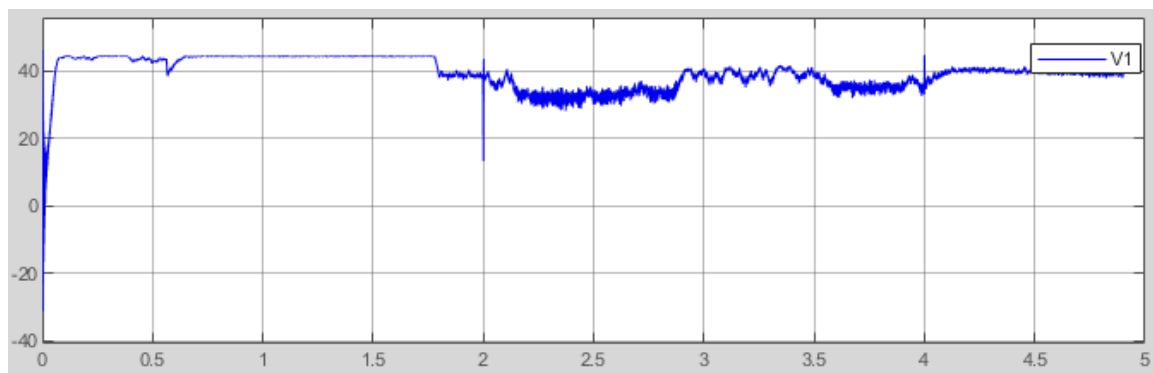
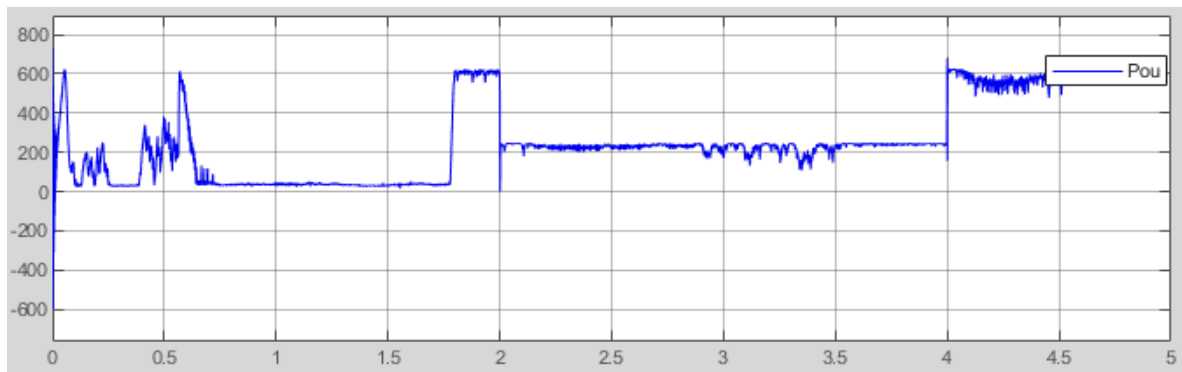


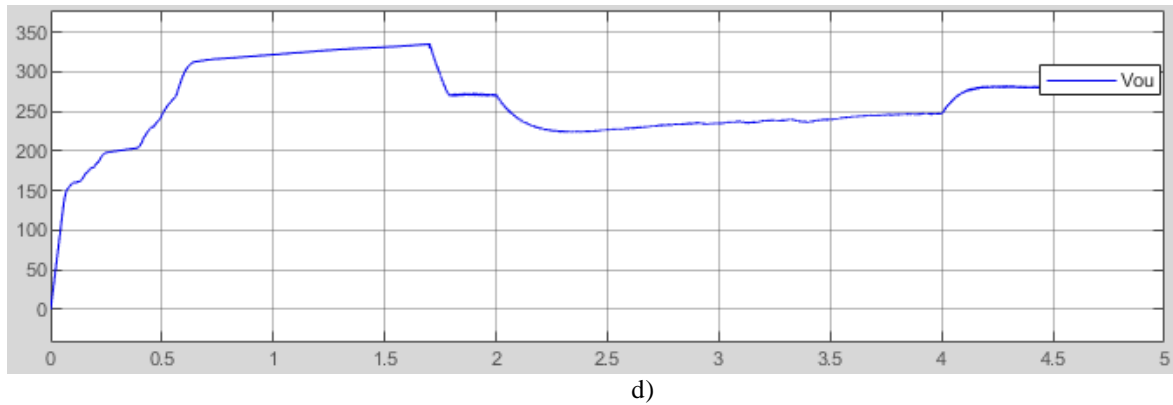
Nota: La grafica representa el perfil de Irradiancia [$\frac{W}{m^2}$] vs. Tiempo [s].

Los resultados para este primer caso de estudio se presentan en las figuras 24 y 25. En primera instancia, se verifica el funcionamiento del algoritmo MPPT implementado en el sistema, pues en las señales obtenidas en la figura 24, se observa que la potencia entregada (P_{ou}) por el generador fotovoltaico se establece en su punto máximo para las condiciones de irradiancia consideradas, con un tiempo de respuesta de aproximadamente 0,2 [s]. Por otra parte, el rizado de la corriente por el arreglo fotovoltaico (I_L) está alrededor de los 1,8 [A]. Por último, la tensión del bus de continua (V_{ou}) busca estabilizarse en 250 [V], aunque es demorado este proceso de estabilización para los casos de análisis planteados.

Cabe resaltar, que el análisis de las señales de corrientes y tensión es realizado desde el momento en que los dos sistemas son interconectados por completo ($t > 1.7$ [s]).

Figura 24 Caso 1: Señales del convertidor y el bus de continua.

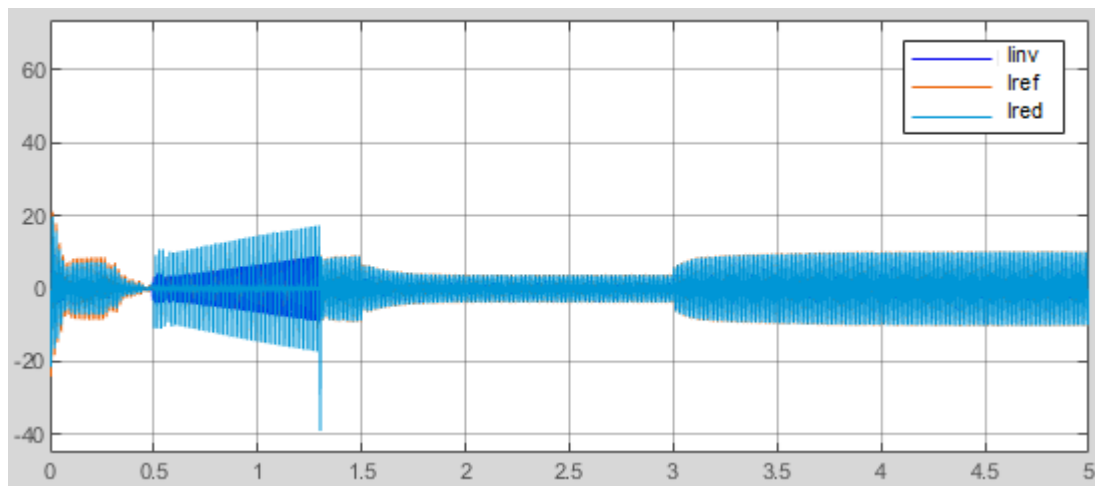




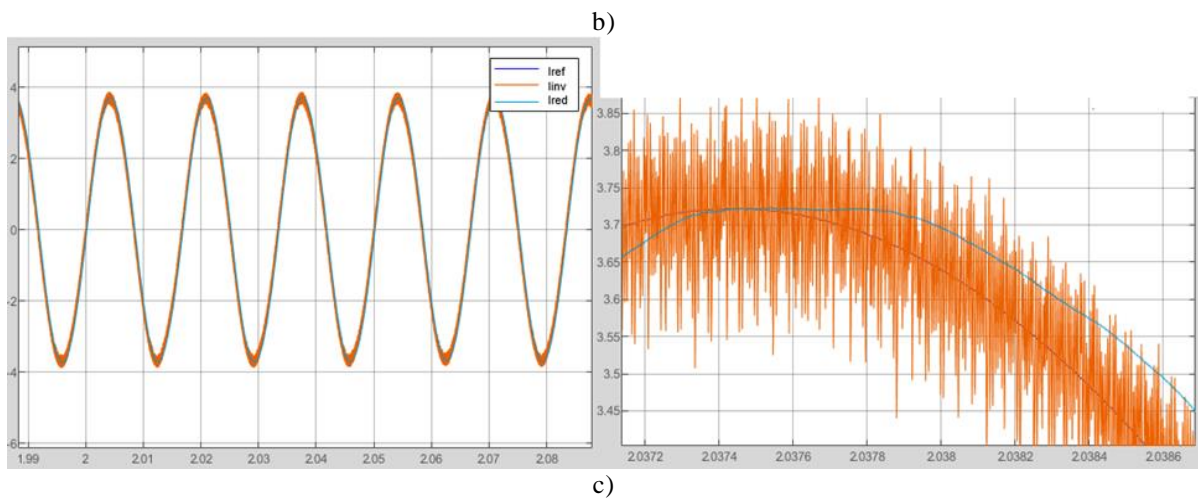
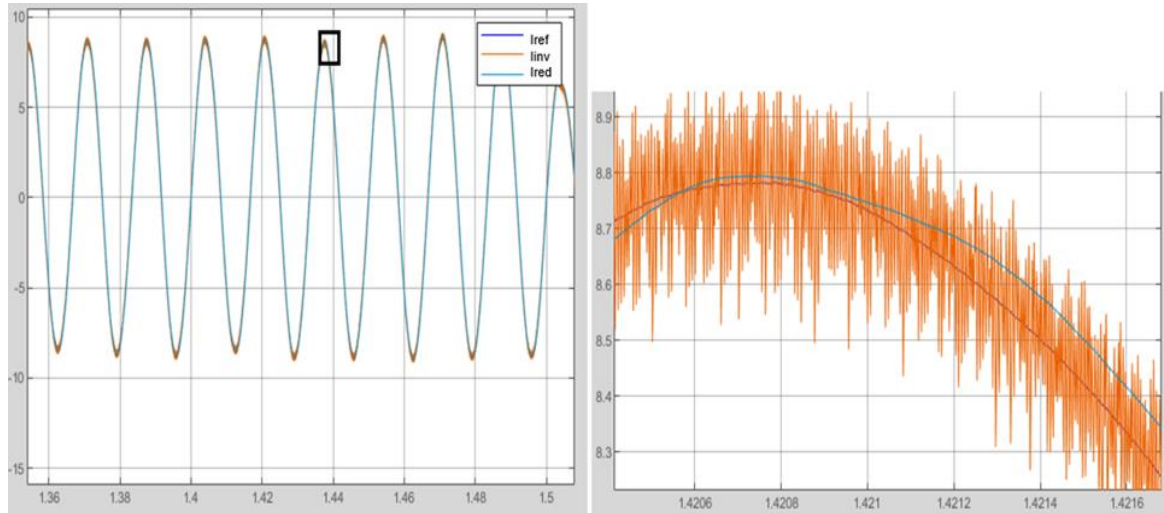
Nota: Cada una de las figuras corresponden a las señales de: (a) Potencia entregada por los generadores fotovoltaicos. (b) Tensión generada por los generadores fotovoltaicos. (c) Corriente en el inductor del convertidor. (d) Tensión en el bus de continua.

En la figura 25 se observan la corriente de referencia, la corriente suministrada a la red y la corriente a la salida del inversor. Tal como se observa en esta figura, se garantiza el suministro de potencia al sistema y el correcto seguimiento de la corriente de referencia.

Figura 25 Caso 1: Gráficas de corriente suministrada a la red.



a)



Nota: la gráfica hace referencia a: (a) Corriente de referencia, corriente suministrada a la red y corriente a la salida del inversor. (b) Acercamiento de las corrientes cuando el panel se somete a una irradiancia de $1000 \left[\frac{W}{m^2} \right]$. (c) Acercamiento de las señales de corriente para una irradiancia de $400 \left[\frac{W}{m^2} \right]$.

6 Conclusiones

En este trabajo de grado se realizó el estudio y la simulación de un conjunto de convertidores DC-DC en topología elevadora, interconectados con un inversor de potencia de

tres niveles en topología de puentes H en cascada con filtro LCL de conexión a la red de baja tensión. Así, según lo mencionado anteriormente se tiene que:

Se corroboró el funcionamiento del convertidor DC-DC bajo los parámetros hallados en el diseño de los componentes. Los valores determinados para cada uno de los elementos del convertidor permitieron garantizar la funcionalidad del circuito y su operación en modo continuo, frente a cambios bruscos de irradiancia.

Se implementó un algoritmo P&O para la búsqueda del punto de máxima potencia, para así garantizar un mejor rendimiento del sistema fotovoltaico. Adicionalmente, se tiene que una vez iniciada la simulación fue necesario definir un tiempo de establecimiento del sistema generador-convertidor, en este caso de mínimo 1,5 [s], este tiempo es el requerido para la posterior conexión del sistema inversor-filtro y red de baja tensión. Por otra parte, cuando el sistema se encuentra estable y se presenta cualquier tipo de perturbación como cambio de irradiancia, el algoritmo busca estabilizar el convertidor para entregar la máxima potencia al sistema.

Se diseñó y simuló un inversor trifásico en topología CHB de tres niveles, y el filtro LCL de conexión a la red, donde el filtro tiene como función objetivo mejorar la calidad de la corriente inyectada a la red. Asimismo, se diseñó una estrategia de control de corriente basada en un regulador PI para el seguimiento de la corriente de referencia y, asimismo, se implementó una estrategia para la generación de las corrientes de referencia, lo que permite la sincronización del inversor con las tensiones en el punto de acoplamiento común y la inyección de potencia activa a la red.

Los resultados de la interconexión del sistema completo de generación de energía fotovoltaico hasta la conexión a la red de baja tensión a través de un filtro LCL, corresponden con los resultados esperados en la operación en estado estable del sistema. Como se evidenció en el capítulo 5, las transiciones de respuesta del panel en cuanto a la máxima entrega de potencia del generador fotovoltaico son rápidas, aproximadamente 0,3 [s], mientras que el cambio en la tensión del bus de continua es lento, sin embargo se resalta que el sistema busca estabilizar el valor de tensión del condensador en 250 [V] ante cambios en las condiciones de operación. Y por último se observa el éxito de la sincronización de fases con respecto a las corrientes inyectadas a la red.

7 Recomendaciones

Enfatizando en el desarrollo y mejoramiento de la eficiencia del sistema, es recomendable analizar diferentes estrategias de control para el seguimiento del punto de máxima potencia implementado para el convertidor DC-DC. Se recomienda realizar un análisis del sistema frente a sombras parciales presentadas en los generadores fotovoltaicos, con el fin de ejercer mayor control y aumentar el rendimiento general del sistema para su futura implementación.

Es recomendable realizar la implementación del sistema propuesto en este trabajo de grado, empleando microcontroladores para ejecutar los procesos de control con el fin de

obtener un comparativo frente a los resultados obtenidos en simulación, y determinar la viabilidad económica de reproducción del proyecto a mediana y/o gran escala.

Referencias Bibliográficas

Almeida, D. (2018). Caracterización de Inversores multinivel tipo puente-H en cascada. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Universidad Industrial de Santander.

Archila, J. (2016). Implementación de un convertidor SEPIC para el seguimiento del punto de máxima potencia en sistemas fotovoltaicos. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Universidad Industrial de Santander.

Castellanos Martínez, C. E., & Quiñones González, G. A. (2013). Integración De Sistemas Fotovoltaicos a La Red: Técnicas De Control Para El Seguimiento Del Punto De Máxima Potencia. Trabajo de grado para optar al título de ingeniero electricista. In Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente (Vol. 11). Universidad Industrial de Santander.

Cossoli, P., Cáceres, M., Vera, L., Firman, A., y Busso, A. (2018). Proportional-Resonant Controller And LCL Filter Design For Single-Phase Grid-Connected PV Micro-Inverters. In 2018 IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exhibition-Latin America (T&D-LA) (pp. 1-5). IEEE.

De Yong, D., Maldonado, M., Lovera, S., & Magnago, F. (2016). Analisis De Sistemas Fotovoltaicos Operando Bajo Condiciones De Sombra Parcial. Acta de La XXXIX Reunión de Trabajo de La Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente, November.

EOPLLY 156P/72(290-320W) Polycrystalline Solar Module. EOPLLY NEW ENERGY TECHNOLOGY CO., LTD optimized photovoltaic solutions, de https://db.photovoltaikforum.com/PvForum/api/download/1/63250/1/pdf/63246_EP_156_P72_290_320_EN_04_12

Franquelo, L., Rodriguez, J., Leon, J., Kouro, S., Portillo, R., & Prats, M. (2008). The age of multilevel converters arrives. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 2(2), 28-39. <https://doi.org/10.1109/mie.2008.923519>

Garciglia, R. S. (s. f.). **PANELES SOLARES: GENERADORES DE ENERGÍA ELÉCTRICA.** Revista de divulgación Saber más UMSNH. Recuperado 6 de noviembre de 2020, de <https://saberma.umich.mx/archivo/tecnologia/133-numero-1755/268-paneles-solares-generadores-de-energia-electrica.html#:~:text=Las%20celdas%20fotovoltaicas%20son%20dispositivos,sobre%20ellos%2C%20generando%20energ%C3%ADa%20el%C3%A9ctrica.&text=Los%20m%C3%B3dulos%20fotovoltaicos%20admiten%20tanto,el%C3%A9ctrica%20incluso%20en%20d%C3%ADas%20nublados>.

Hart, Daniel W. (2001). *Electrónica de potencia*. Pearson Education.

Jain, D., & Kalla, U. K. (2016, November). Design and analysis of LCL filter for interconnection with grid connected PV system. In *2016 IEEE 7th Power India International Conference (PIICON)* (pp. 1-6). IEEE.

La importancia de las energías limpias. (2017, 30 octubre). World Bank.

<https://www.bancomundial.org/es/news/feature/2017/10/30/la-importancia-de-las-energias-limpias>

Mantilla, M. (2016). Control de generadores fotovoltaicos con funciones de filtrado activo en sistemas trifásicos distorsionados y desequilibrados. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Universidad Industrial de Santander.

Namboodiri, A., & Wani, H. S. (2014). Unipolar and bipolar PWM inverter. International Journal for Innovative Research in Science & Technology, 1(7), 237-243.

Ogata, K. (2010). Ingeniería de control moderna (5.a ed.). Pearson education.

Pal, B., Sahu, P. K. and Mohapatra, S. (2018). A review on feedback current control techniques of grid-connected PV inverter system with LCL filter," 2018 Technologies for Smart-City Energy Security and Power (ICSESP), Bhubaneswar, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICSESP.2018.8376682.

Plan de Expansión de Referencia Generación - Transmisión 2015 – 2029, (2016, 01 febrero).

Unidad de Planeación Minero Energética – UPME.

<https://www1.upme.gov.co/Paginas/Plan-Expansion-2015-2029.aspx>

Rashid, M. H. (2004). Electrónica de potencia: circuitos, dispositivos y aplicaciones. México. Pearson Education

Rodriguez, J., Franquelo, L. G., Kouro, S., Leon, J. I., Portillo, R. C., Prats, M. A. M., & Perez, M. A. (2009). Multilevel converters: An enabling technology for high-power applications. *Proceedings of the IEEE*, 97(11), 1786-1817.

<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=529011>

Villa, A. (2011). Estudio del Filtro LCL aplicado a Inversores Fotovoltaicos. Departamento de ingeniería eléctrica. Universidad Carlos III de Madrid.

<https://core.ac.uk/download/pdf/30044517.pdf>

Wu, B., Narimani, M. (2017) "Voltage Source Inverter Fed Drives," in *High-Power Converters and AC Drives*, IEEE, pp.287-308, doi: 10.1002/9781119156079.ch12.

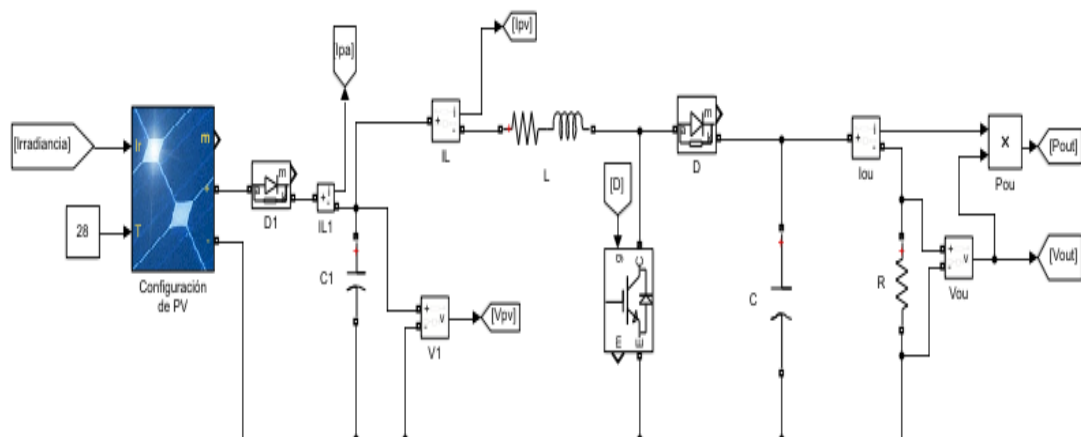
Apéndices

Apéndice A Señales del Convertidor DC-DC elevador.

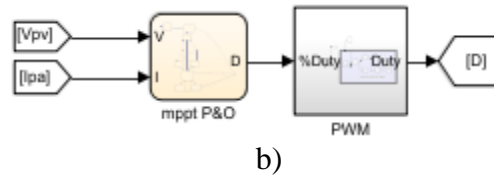
El sistema Generador-Convertidor se simuló con una carga netamente resistiva fija a la salida de este, como se observa en la figura 26, con el fin de verificar el funcionamiento del algoritmo MPPT y principalmente para observar el comportamiento de la corriente en el inductor, para garantizar el funcionamiento en modo de operación continuo del convertidor DC-DC elevador.

Como se mencionó en la sección 3.2, el algoritmo de control implementado para los tiempos de conmutación del IGBT del convertidor, se calcula teniendo en cuenta los parámetros a la salida del generador fotovoltaico, como se puede observar en la figura 26.b.

Figura 26 Conexión y control del convertidor DC-DC con carga resistiva a la salida.

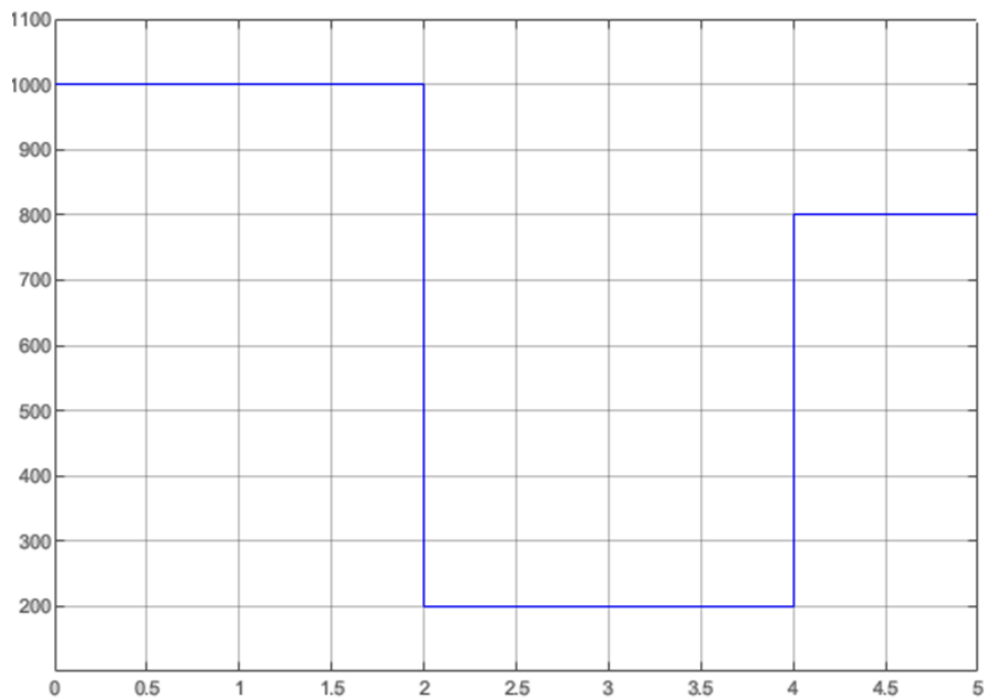


a)



Teniendo en cuenta las condiciones de operación del convertidor DC-DC, y para garantizar el funcionamiento en modo continuo del sistema frente a cualquier cambio en la irradiancia incidente sobre los paneles solares, se realiza un análisis del convertidor para determinar las posibles condiciones sobre las cuales puede caer la corriente en el inductor a cero. Para ello se simula el sistema con el perfil de irradiancia mostrado a continuación asumiendo constante el valor de la temperatura de los paneles solares 28 [°C]:

Figura 27 Perfil de irradiancia para análisis de la corriente en el inductor del Convertidor DC-DC.



Nota: La grafica representa el perfil de Irradiancia [$\frac{W}{m^2}$] vs. Tiempo [s].

Entonces, según el perfil de irradiancia de la figura 27, se analiza el sistema tomando como referencia los valores de la tabla 13, se procede a realizar el análisis de las señales obtenidas del convertidor, enfocando la atención en la corriente en el inductor y evidentemente en el comportamiento del sistema, teniendo en cuenta la funcionalidad del algoritmo de control P&O implementado. Los parámetros calculados, corresponden a los valores de la tabla 13.

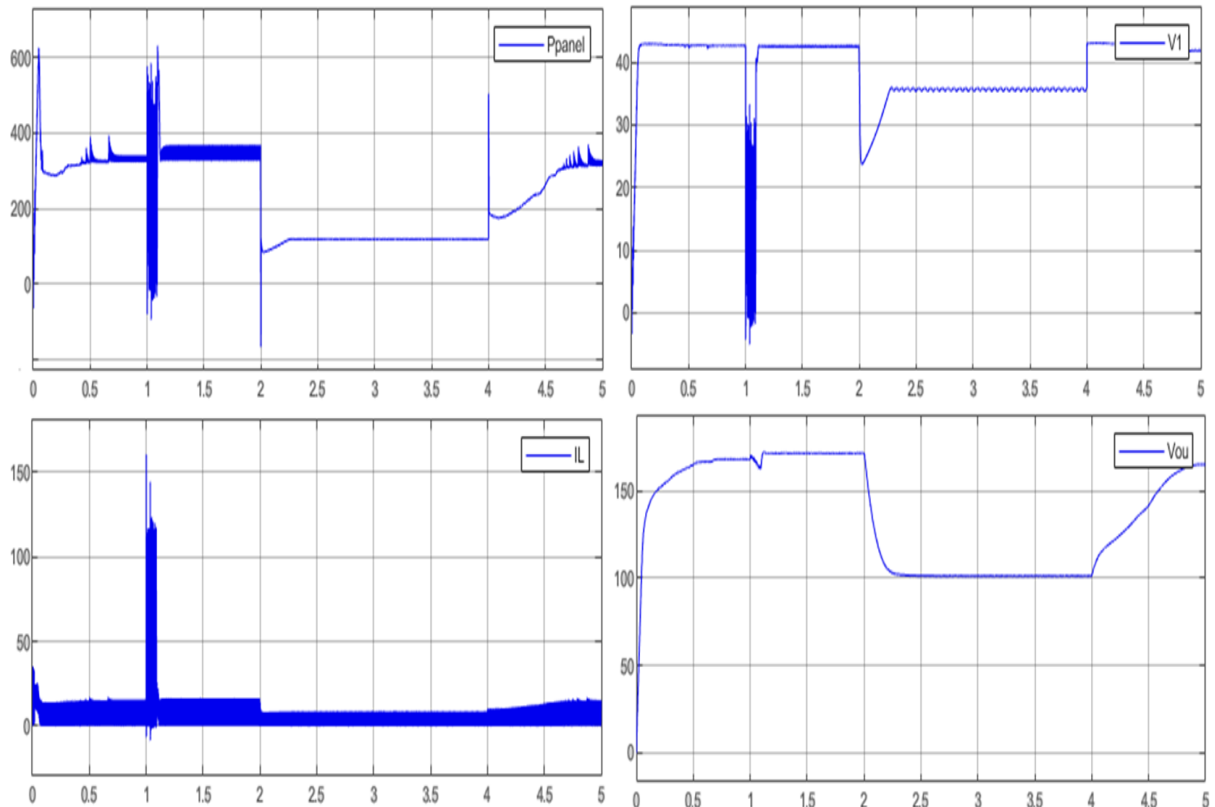
- Consideración 1: Simulación del sistema con los parámetros calculados del convertidor

Tabla 13 Parámetros calculados para el Convertidor DC-DC.

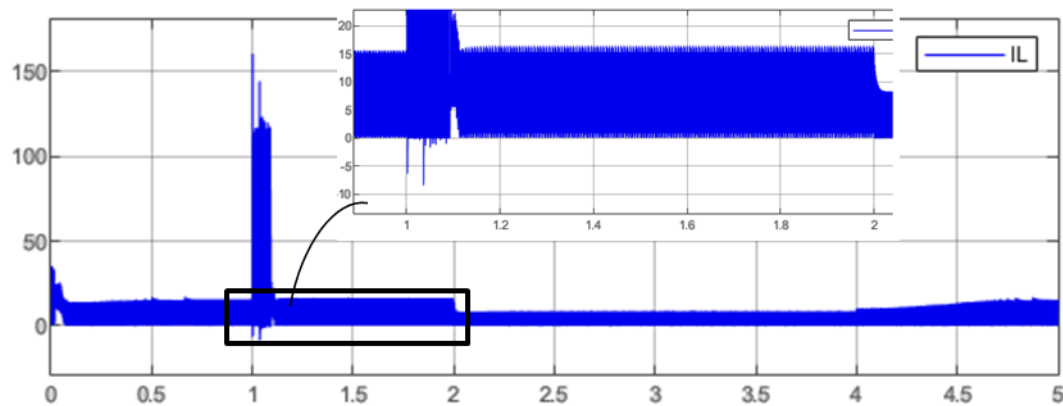
V_s	35 [V]
V_{out}	250 [V]
D	0,86
L	0,07 [mH]
C	2200 [μ F]
f	30 [kHz]
C_{in}	1000 [μ F]
R	89 [Ω]

Los resultados de la simulación con los parámetros calculados se observan en seguida

Figura 28 Señales del convertidor, teniendo en cuenta los parámetros de diseño.



a)



b)

Nota: las gráficas presentadas corresponden según su leyenda (en la parte de la derecha), así: (a) P_{pa} , es la potencia del panel; IL , es la señal de corriente en el inductor; $V1$, es la tensión a la entrada del convertidor y $V0$, es la tensión de salida del convertidor. (b) corresponde al acercamiento en 1 y 2 [s], tiempo en el que cambia arbitrariamente la irradiancia del panel.

Los resultados de la simulación específicamente en la figura 28 b), evidencian que la corriente en el inductor cae por debajo de cero, cuando se presenta un cambio brusco en la irradiancia, por tal motivo, el valor del inductor debe aumentar, con el fin de asegurar el funcionamiento del sistema en cualquier circunstancia y adicionalmente reducir el rizado de la corriente del mismo teniendo en cuenta que se busca un rizado de la corriente de aproximadamente 3.3 [A] (Ver sección 3.1.2).

- Consideración 2: Simulación del sistema con los modificando los valores del inductor.

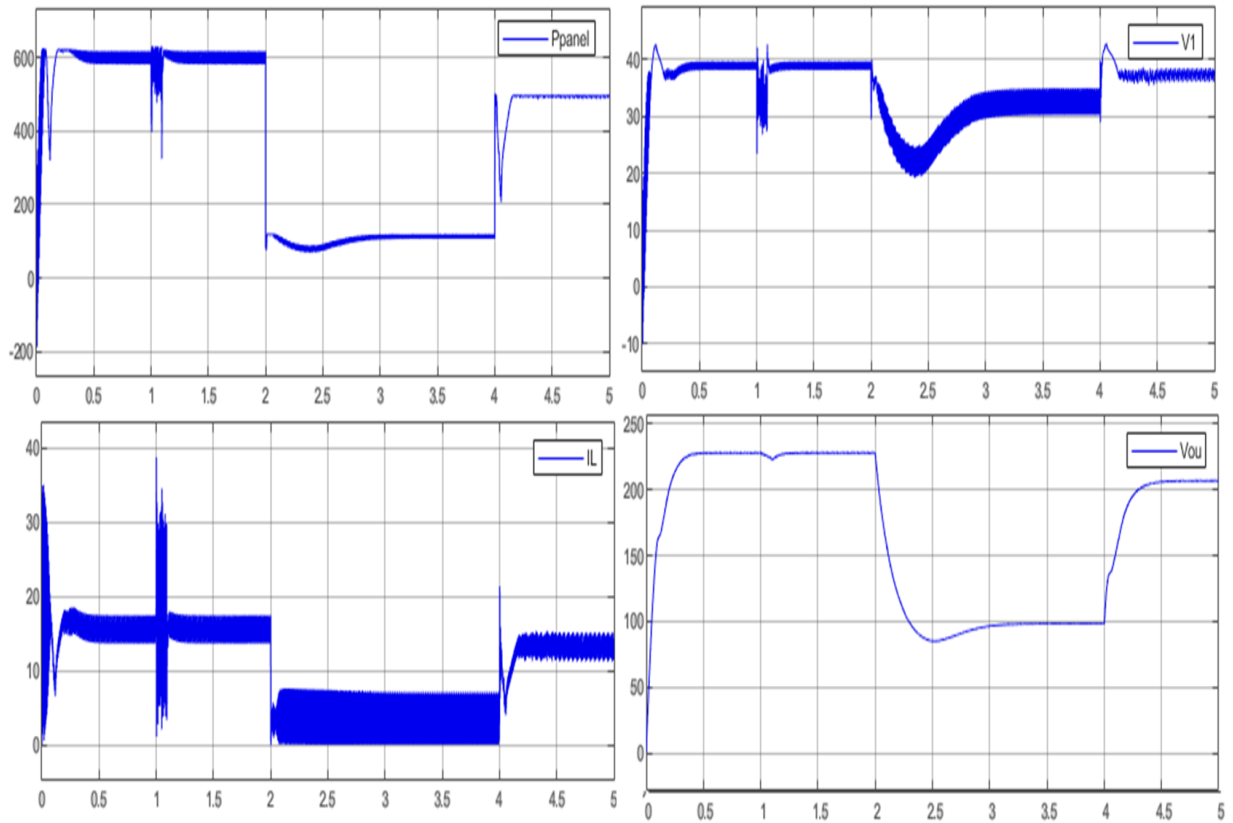
Con el fin de asegurar el funcionamiento del sistema en general, se decide aumentar el valor del inductor en 10 veces, obteniendo los siguientes elementos del convertidor para la simulación.

Tabla 14 Parámetros del Convertidor DC-DC para la consideración 2

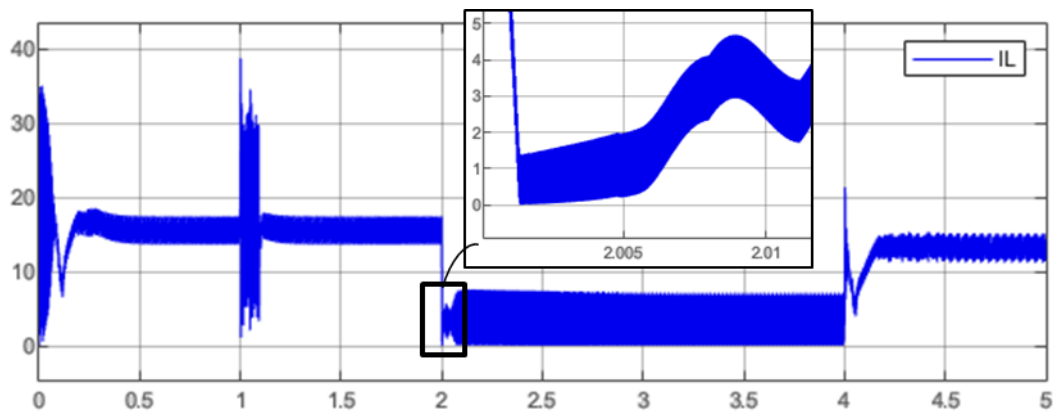
L	0,7 [mH]
C	2200 [μ F]
C_{in}	1000 [μ F]

Y como producto de la simulación bajo los parámetros mencionados, se obtienen los siguientes resultados,

Figura 29 Señales del convertidor, teniendo en cuenta los parámetros de diseño y operativos.



a)



b)

Nota: (a) señales analizadas del convertidor. (b) corresponde al acercamiento en 2 [s], tiempo en el que cambia arbitrariamente la irradiancia del panel.

Se concluye que, con el nuevo valor del inductor, se puede asegurar el funcionamiento del sistema en régimen permanente, aunque el rizado en la corriente del inductor es un poco alta, se considera realizar una última prueba, consideración 3, para disminuir este valor.

- Consideración 3: Parámetros del convertidor definitivos.

Con el fin de disminuir el valor del rizado de la corriente, se elige aumentar el valor del inductor 18 veces el valor calculado para su diseño, es decir

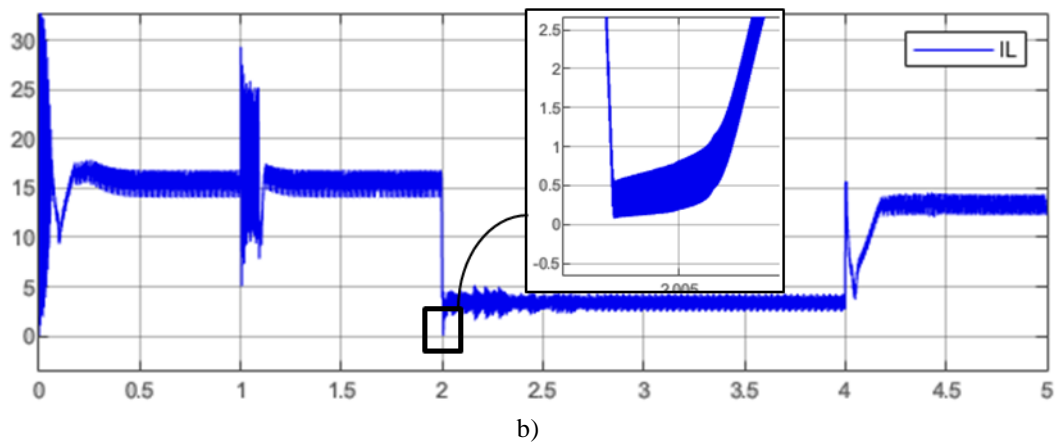
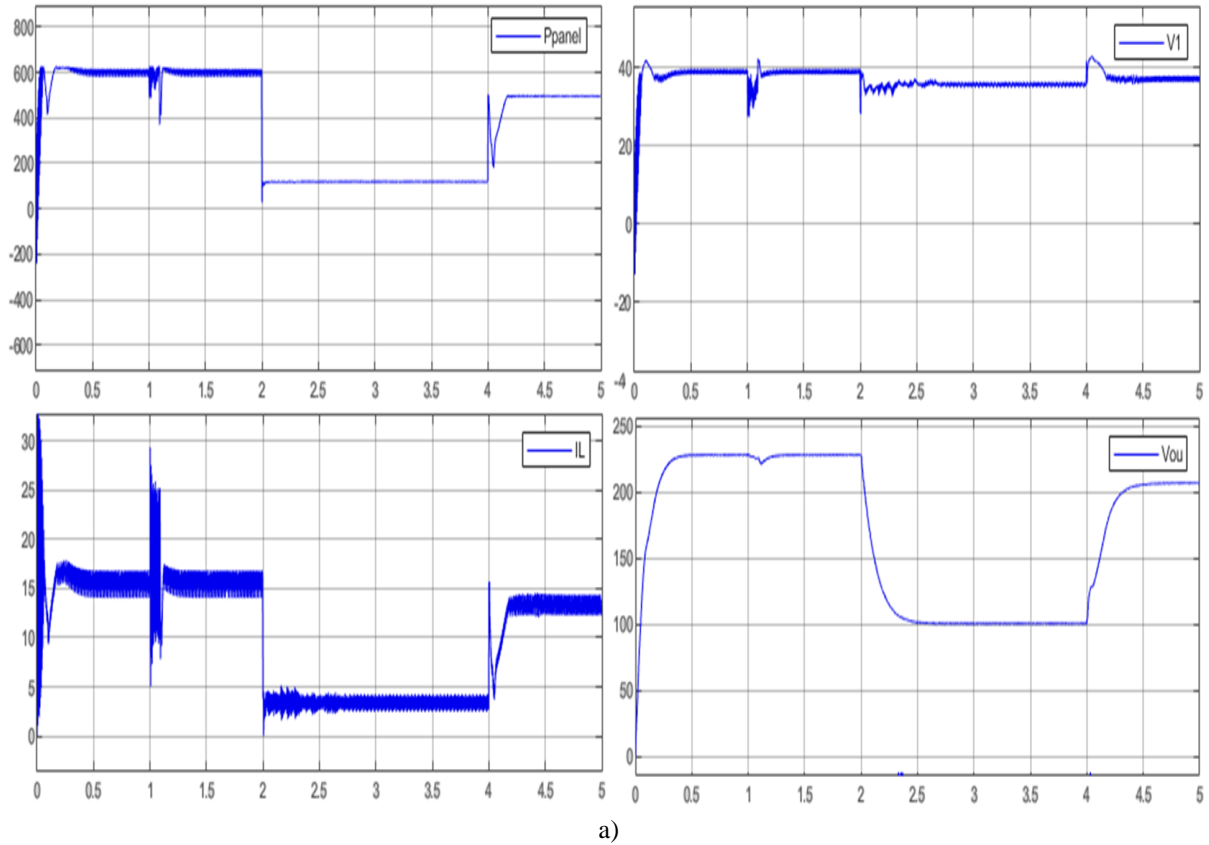
$$L_{nueva} = 15 * L_{diseño} = 15 * 0,07[\mu H] \simeq 1[mH]$$

Tabla 15 Parámetros definitivos del convertidor DC-DC.

<i>L</i>	1 [mH]
<i>C</i>	2200[μ F]
<i>C_{in}</i>	1000 [μ F]
<i>R</i>	89 [Ω]

Los resultados de simulación basados en la tabla 15, se muestran a continuación

Figura 30 Señales del convertidor, parámetros definitivos del convertidor DC-DC.



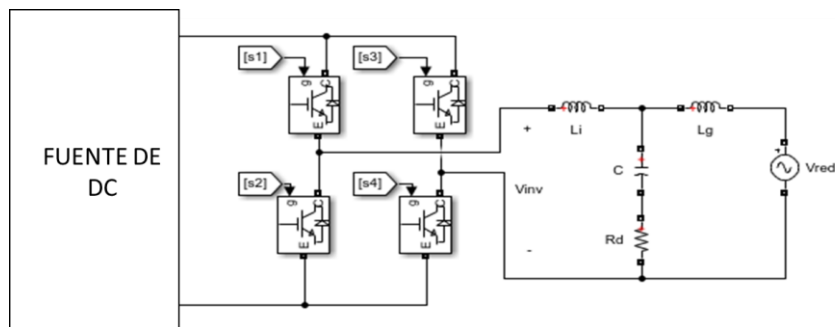
Nota: (a) señales analizadas del convertidor. (b) corresponde al acercamiento en 2 [s], tiempo en el que cambia arbitrariamente la irradiancia del panel.

En conclusión, se presenta que las gráficas obtenidas del funcionamiento del convertidor elevador con la estrategia de control P&O, corresponden a un modelo funcional del sistema, pues garantiza el funcionamiento del sistema frente a cualquier cambio de irradiancia.

Apéndice B Señales obtenidas del Inversor con las estrategias de generación de la referencia y control de corriente

Para la simulación de este sistema, se tuvo en cuenta la implementación de un sistema de control para la conmutación de los IGBT del inversor, basado en estrategias de control de fase, donde las corrientes de referencia se calcularon según el valor de la potencia activa suministrado por el generador fotovoltaico.

Figura 31 Esquema e conexiones del inversor y su conexión a la red a través del filtro LCL.



Las señales obtenidas por el sistema conformado por el inversor y la conexión a la red de baja tensión, se pueden observar en la siguiente figura:

Figura 32 Corrientes a suministrar a la red de baja tensión.

