



**EDUCACIÓN**  
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CIUDAD MADERO**  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELÉCTRICA



"POR MI PATRIA Y POR MI BIEN"

**TESIS**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN RESTAURADOR DINÁMICO DE VOLTAJE (DVR)  
SOPORTADO POR PANELES SOLARES**

Que para obtener el Grado de  
**Maestro en Ingeniería Eléctrica**

Presenta  
**Ing. Omar Antonio Lara**  
G14071383  
CVU: 1036314

Director de Tesis  
**Dr. Pedro Martín García Vite**  
CVU: 227310

Co-director de Tesis  
**M.C. Hermenegildo Cisneros Villegas**

Cd. Madero, Tamaulipas

Agosto 2022

Ciudad Madero, Tamaulipas, **05/agosto/2022**

**OFICIO No.:** U.113/22  
**ASUNTO:** AUTORIZACIÓN DE  
IMPRESIÓN DE TESIS

**C. OMAR ANTONIO LARA**  
**No. DE CONTROL G14071383**  
**P R E S E N T E**

Me es grato comunicarle que después de la revisión realizada por el Jurado designado para su Examen de Grado de Maestría en Ingeniería Eléctrica, se acordó autorizar la impresión de su tesis titulada:

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN RESTAURADOR DINÁMICO DE VOLTAJE (DVR) SOPORTADO POR PANELES SOLARES”**

El Jurado está integrado por los siguientes catedráticos:

PRESIDENTE:	DR.	PEDRO MARTÍN GARCÍA VITE
SECRETARIO:	MTRO.	HERMENEGILDO CISNEROS VILLEGAS
VOCAL:	MTRO.	RAFAEL CASTILLO GUTIÉRREZ
SUPLENTE:	MTRO.	AARÓN GONZÁLEZ RODRÍGUEZ
DIRECTOR DE TESIS:	DR.	PEDRO MARTÍN GARCÍA VITE
CO-DIRECTOR:	MTRO.	HERMENEGILDO CISNEROS VILLEGAS

Es muy satisfactorio para la División de Estudios de Posgrado e Investigación compartir con usted el logro de esta meta. Espero que continúe con éxito su desarrollo profesional y dedique su experiencia e inteligencia en beneficio de México.

## **ATENTAMENTE**

*Excelencia en Educación Tecnológica*

*"Por mi patria y por mi bien"*



**MARCO ANTONIO CORONEL GARCÍA**  
**JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE**  
**POSGRADO E INVESTIGACIÓN**



c.c.p.- Archivo  
MACG



Av. 1° de Mayo y Sor Juana I. de la Cruz S/N Col. Los Mangos C.P. 89440 Cd. Madero, Tam.

Tel. 01 (833) 357 48 20, ext. 3110, e-mail: [depi\\_cdmadero@tecnm.mx](mailto:depi_cdmadero@tecnm.mx)

[tecnm.mx](http://tecnm.mx) | [cdmadero.tecnm.mx](http://cdmadero.tecnm.mx)



# **Dedicatoria**

A mis padres, quienes me han apoyado incondicionalmente desde el inicio tanto moral como económicamente para llegar a ser un profesional.

# Agradecimientos

Primeramente agradezco a Dios por guiarme por el buen camino y ayudarme a lograr mis metas en la vida.

Agradezco a las siguientes personas e instituciones por su apoyo y colaboración en la realización del presente trabajo de investigación:

Al Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Ciudad Madero y a la División de Estudios de Posgrado e Investigación.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo brindado a través de la beca 758746.

A mi director de tesis el Dr. Pedro Martín García Vite, por compartir sus conocimientos y experiencias, por proporcionarme retroalimentación a lo largo de la elaboración de este proyecto. A mis compañeros de la MIE y de la MCI por su tiempo compartido, ayuda, comentarios y motivación; Jorge Luis Cruz González , Mario Alberto Castillo Hernández , Aracely Zapién Castillo, Jose Ángel Zumaya García y Osvaldo Mendoza Domínguez .

Infinitamente a mis padres por ser un ejemplo de perseverancia y trabajo.

# Resumen

En este trabajo se presenta el diseño y simulación de un Restaurador Dinámico de Voltaje (DVR, por sus siglas en inglés, *Dynamic Voltage Restorer*) para mitigar problemas de la calidad de la energía como huecos y elevaciones de tensión en cargas sensibles a este tipo de perturbaciones. La propuesta incluye una topología de compensación utilizando una de las energías renovables con mayor auge actualmente, que es la energía solar fotovoltaica. El DVR debe operar con un lazo de control, monitoreando el voltaje en la carga y generando el voltaje de compensación durante el disturbio. La energía para la compensación, es obtenida de un arreglo de paneles solares y posteriormente acondicionada mediante un convertidor estático de potencia para la inyección de potencia activa. El algoritmo de control propuesto en este trabajo se basa en las transformaciones de Clark y Park para generar las señales requeridas para la compensación de voltaje y sincronía con la red, estas herramientas matemáticas permiten fijar las variables y con ello simplicidad para el diseño del controlador. Los resultados de la simulación en MATLAB/Simulink son usados para mostrar el desempeño de la topología propuesta ante huecos de tensión simétricos en el sistema de distribución.

# Abstract

This work presents the design and simulation of a Dynamic Voltage Restorer (DVR) to mitigate power quality problems such as voltage sags and swells at sensitive loads to these types of disturbances. The proposal includes a compensation topology using one the most popular of the renewable energies, currently employed, which is photovoltaic solar energy. The DVR must operate with a control loop, monitoring the voltage at the load side and generating the voltage for compensation during the disturbances. The energy is obtained from an array of solar panels and then conditioned by a static power converter for the injection of active power. The control algorithm proposed in this work is based on Clark and Park transformations to generate the signals required for voltage compensation and synchrony with the grid, these mathematical techniques allow fixing the variables and hence simplicity for the controller design. The results of the simulation in MATLAB/Simulink are used to show the performance of the proposed topology with symmetrical voltage sags in the distribution system.

# Índice general

Dedicatoria . . . . .	I
Agradecimientos . . . . .	II
Resumen . . . . .	III
Abstract . . . . .	IV
Índice de Tablas . . . . .	VIII
Índice de Imágenes . . . . .	IX
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 Antecedentes . . . . .	2
1.2 Planteamiento del Problema . . . . .	3
1.3 Justificación . . . . .	3
1.4 Objetivos . . . . .	4
1.4.1 Objetivo general . . . . .	4
1.4.2 Objetivos específicos . . . . .	4
1.5 Hipótesis . . . . .	5
1.6 Alcances y Limitaciones . . . . .	6
1.6.1 Alcances . . . . .	6
1.6.2 Limitaciones . . . . .	6
<b>2 Marco Teórico</b>	<b>7</b>
2.1 Calidad de la energía . . . . .	8
2.1.1 Definiciones de calidad de la energía . . . . .	8
2.1.2 Factores que afectan la calidad de la energía. . . . .	9

2.1.3	Disturbios en la calidad de la energía . . . . .	9
2.1.4	Variaciones de voltaje de corta duración . . . . .	9
2.2	El Restaurador Dinámico de Voltaje (DVR) . . . . .	14
2.2.1	Partes que conforman un DVR . . . . .	14
2.2.2	Principio de funcionamiento del DVR . . . . .	15
2.2.3	Topologías del DVR . . . . .	17
2.3	Sistemas de generación PV . . . . .	20
2.3.1	Modelo matemático de un panel PV . . . . .	21
2.3.2	Curva característica de un panel PV . . . . .	23
2.3.3	Efectos de la irradiancia y la temperatura . . . . .	24
2.4	Conclusión . . . . .	24
<b>3</b>	<b>Funcionamiento general del DVR soportado con paneles solares</b>	<b>26</b>
3.1	Topología propuesta . . . . .	27
3.2	Dimensionamiento del Sistema de distribución . . . . .	27
3.2.1	SED implementado en Simulink/MATLAB . . . . .	30
3.3	El panel solar . . . . .	33
3.3.1	Panel PV conectado a una resistencia de carga fija . . . . .	34
3.3.2	Panel PV conectado a una resistencia de carga variable . . . . .	36
3.4	Diseño del convertidor CD-CD . . . . .	38
3.4.1	Convertidor Boost . . . . .	38
3.4.2	Panel PV con Convertidor Boost . . . . .	40
3.5	Inversor de voltaje trifásico . . . . .	42
3.5.1	Inversor trifásico implementado en Simulink/MATLAB . . . . .	46
3.5.2	Sistema de control SPWM implementado en Simulink . . . . .	46
3.6	Diseño del filtro LC . . . . .	48
3.7	Dimensionamiento de los transformadores de inyección . . . . .	50
3.8	Conclusión . . . . .	52
<b>4</b>	<b>Sistema de control del DVR</b>	<b>53</b>

4.1	Control del DVR . . . . .	54
4.1.1	Transformaciones de Clark y Park . . . . .	54
4.1.2	Sistema de sincronización . . . . .	58
4.2	Esquema del controlador implementado . . . . .	61
4.3	Control del convertidor . . . . .	62
4.4	Conclusión . . . . .	63
<b>5</b>	<b>Simulación del DVR y resultados</b>	<b>64</b>
5.1	Resultados de simulación . . . . .	65
5.1.1	Resultados para un voltaje normal en la red . . . . .	68
5.1.2	Resultados para un sag de voltaje en la red . . . . .	71
5.1.3	Resultados para un swell de voltaje en la red . . . . .	75
5.2	Conclusión . . . . .	81
<b>6</b>	<b>Conclusiones Generales y Trabajos Futuros</b>	<b>83</b>
6.1	Conclusiones generales . . . . .	84
6.2	Recomendaciones para trabajos futuros . . . . .	85
	<b>Bibliografía</b>	<b>85</b>

# Índice de tablas

Tabla 2.1	Perturbaciones de corta duración según IEEE 1159. . . . .	10
Tabla 2.2	Parámetros del modelo del panel PV. . . . .	22
Tabla 3.1	Parámetros propuestos para el SED. . . . .	29
Tabla 3.2	Parámetros del panel PV utilizado para simulación. . . . .	34
Tabla 3.3	Parámetros del convertidor Boost. . . . .	41
Tabla 3.4	Parámetros del Filtro LCR. . . . .	50
Tabla 3.5	Parámetros del transformador de inyección. . . . .	52
Tabla 5.1	Parámetros de simulación del DVR . . . . .	66

# Índice de figuras

Figura 1.1	Diagrama de bloques de la topología propuesta para en DVR. . . . .	5
Figura 2.1	Interrupción de energía. . . . .	11
Figura 2.2	Hueco de tensión o sag de voltaje. . . . .	12
Figura 2.3	Forma de onda del voltaje al ocurrir un swell. . . . .	13
Figura 2.4	Diagrama básico de un DVR. . . . .	14
Figura 2.5	Origen de los sags de voltaje. . . . .	17
Figura 2.6	DVR sin almacenamiento de energía, con un convertidor shunt en el lado de suministro. . . . .	18
Figura 2.7	DVR sin almacenamiento de energía, con un convertidor shunt en el lado de la carga. . . . .	19
Figura 2.8	DVR con almacenamiento de energía y con voltaje de CD variable. . . .	20
Figura 2.9	DVR con almacenamiento de energía y con voltaje de CD constante. . .	20
Figura 2.10	Modelo eléctrico de una celda PV. . . . .	21
Figura 2.11	Curva característica de un panel PV. . . . .	23
Figura 2.12	Efecto de la irradiancia en un panel PV. . . . .	24
Figura 2.13	Efecto de la temperatura en un panel PV. . . . .	25
Figura 3.1	Topología del DVR propuesta. . . . .	28

Figura 3.2	Diagrama esquemático del SED. . . . .	28
Figura 3.3	Carga RL trifásica balanceada . . . . .	30
Figura 3.4	Diagrama de bloques en Simulink de la Fase a. . . . .	31
Figura 3.5	Conversión de señales de Simulink a Voltaje. . . . .	32
Figura 3.6	Voltaje trifásico de suministro. . . . .	32
Figura 3.7	Diagrama de bloques del SED en Simulink. . . . .	33
Figura 3.8	Panel PV con $R_{carga}$ fija. . . . .	35
Figura 3.9	Panel PV con una resistencia fija en Simulink. . . . .	35
Figura 3.10	Panel PV con una resistencia variable. . . . .	36
Figura 3.11	Panel PV con una resistencia variable en Simulink. . . . .	37
Figura 3.12	Curvas características del panel PV. . . . .	38
Figura 3.13	Diagrama esquemático del convertidor Boost. . . . .	39
Figura 3.14	Convertidor Boost conectado a un panel PV. . . . .	41
Figura 3.15	Convertidor Boost conectado a un Panel PV en Simulink. . . . .	42
Figura 3.16	Inversor trifásico ideal con semiconductores. . . . .	43
Figura 3.17	Técnica de generación SPWM para control de voltaje del inversor trifásico. . . . .	45
Figura 3.18	Inversor trifásico implementado en Simulink. . . . .	46
Figura 3.19	Sistema de control SPWM en Simulink. . . . .	47
Figura 3.20	Voltaje de línea $V_{ab}$ de salida. . . . .	48
Figura 3.21	Filtro LC. . . . .	49
Figura 3.22	Transformador de inyección trifásico (SIT). . . . .	50
Figura 3.23	Transformador trifásico de inyección en Simulink. . . . .	51
Figura 4.1	Bloque de transformación $abc - \alpha\beta$ de acuerdo a (4.1). . . . .	55
Figura 4.2	Bloque de transformación $\alpha\beta - abc$ de acuerdo a (4.2). . . . .	56
Figura 4.3	Bloque de transformación $\alpha\beta - dq$ de acuerdo a (4.3). . . . .	56
Figura 4.4	Bloque de transformación $dq - \alpha\beta$ de acuerdo a (4.4). . . . .	57
Figura 4.5	Voltaje y corriente en un punto del SED. . . . .	57
Figura 4.6	Cálculo de la potencia activa y reactiva. . . . .	58

Figura 4.7	Diagrama de bloques para la implementación del PLL. . . . .	59
Figura 4.8	Generación de señales sincronizadas en $dq$ con un sistema trifásico. . .	60
Figura 4.9	Señales de voltaje en fase con el sistema de distribución. . . . .	60
Figura 4.10	Esquema de control para el DVR. . . . .	61
Figura 4.11	Esquema de control para el convertidor Boost. . . . .	63
Figura 5.1	DVR implementado en MATLAB/Simulink. . . . .	65
Figura 5.2	Bloque de perturbación aplicado al SED. . . . .	67
Figura 5.3	Potencia activa en la carga antes y después de la compensación sin perturbación en el sistema. . . . .	68
Figura 5.4	Potencia entregada por los paneles y el convertidor Boost sin perturbación en el sistema. . . . .	69
Figura 5.5	Ciclo de trabajo aplicado al convertidor sin perturbación en el sistema. .	70
Figura 5.6	Voltaje del arreglo PV y el convertidor sin perturbación en el sistema. . .	70
Figura 5.7	Voltajes sin perturbación en el sistema. . . . .	71
Figura 5.8	Simulación de un sag de voltaje de 0.7 p.u en el sistema. . . . .	72
Figura 5.9	Voltajes para un sag de 0.7 p.u en el sistema. . . . .	72
Figura 5.10	Potencia activa en la carga antes y después de la compensación para un sag de 0.7 p.u en el sistema. . . . .	73
Figura 5.11	Potencia activa entregada por el arreglo PV para un sag de 0.7 p.u en el sistema. . . . .	74
Figura 5.12	Potencia que consume la parte resistiva del filtro LCR. . . . .	74
Figura 5.13	Ciclo de trabajo aplicado al Convertidor Boost para un sag de 0.7 p.u. .	75
Figura 5.14	Voltaje del arreglo PV y del convertidor Boost para un sag de 0.7 p.u. . .	76
Figura 5.15	Potencias en la carga antes y después de la compensación para un sag de 0.7 p.u. . . . .	76
Figura 5.16	Simulación de un swell de voltaje de 1.3 p.u en el sistema. . . . .	77
Figura 5.17	Voltajes para un swell de 1.3 p.u en el sistema. . . . .	78

Figura 5.18	Potencia activa entregada por el arreglo PV para un swell de 1.3 p.u en el sistema. . . . .	78
Figura 5.19	Potencia activa entregada por el arreglo PV para un swell de 1.3 p.u en el sistema. . . . .	79
Figura 5.20	Ciclo de trabajo aplicado al Convertidor Boost para un swell de 1.3 p.u .	79
Figura 5.21	Voltaje del arreglo PV y del convertidor Boost para un swell de 1.3 p.u .	80
Figura 5.22	Potencias en la carga antes y después de la compensación para un swell de 1.3 p.u. . . . .	81
Figura 5.23	Error generado por la acción del controlador. . . . .	82

# Capítulo 1

## Introducción

Actualmente cada vez más nuevos y complejos dispositivos de los usuarios se conectan a la red eléctrica de distribución, y esto requiere tener una buena calidad de la energía en el sistema debido a que generalmente se tienen cargas muy sensibles a cambios de voltaje. Los huecos y elevaciones de tensión son los problemas más comunes que afectan la calidad de la energía en estos sistemas. Para poder mitigar estos problemas de la calidad de la energía existen dispositivos personalizados basados en los FACTS (del inglés, *Flexible AC transmission system*). A nivel distribución, existen sus equivalentes los denominados Acondicionadores de Potencia. Uno de ellos es el DVR que se utiliza para compensación en cargas sensibles ante este tipo de disturbios. En este trabajo se presenta una nueva estructura de compensación basada en un DVR que es abastecido de energía por un sistema PV ante disturbios que ocurran en la carga sensible.<sup>1</sup>

En este capítulo se presenta una breve introducción, en la cual se describe un panorama general de la problemática que se aborda en este proyecto. Dicha problemática está relacionada con la calidad de la energía en sistemas de distribución y uso de energías renovables (solar) como soporte de energía. Se exponen los fundamentos que sustentan el motivo de la investigación. Se incluye además la justificación de la realización de este proyecto y se plantean los objetivos específicos que serán buscados basados en la hipótesis que se propone. Así mismo se especifican los alcances y limitaciones de la investigación.

---

<sup>1</sup>La diferencia de la presente propuesta con la configuración convencional radica en la inyección de potencia activa.

## 1.1. ANTECEDENTES

En los últimos años, las empresas a nivel industrial, así como los usuarios residenciales y comerciales han dirigido su atención en la problemática de la calidad de suministro eléctrico y exigen mejores condiciones en la calidad de la onda de tensión, debido a que una calidad de suministro deficiente trae consigo pérdidas económicas considerables. Actualmente, el sistema eléctrico de distribución cuenta con cargas más sensibles a perturbaciones tales como; fluctuaciones de voltaje, elevaciones y huecos de tensión, como consecuencia de la conexión y desconexión de grandes motores, conexión de sistemas fotovoltaicos a la red, bancos de capacitores, interrupciones de corta duración, entre otros.

Debido al impacto de las elevaciones y huecos de tensión en las cargas industriales, los costos producidos por daños, gastos de mantenimiento y por su elevada frecuencia de aparición, se ha prestado especial atención en los dispositivos de energía personalizados para el sistema de distribución para mejorar la calidad de la energía, como por ejemplo; el compensador estático síncrono de distribución (D-STATCOM), el restaurador dinámico de voltaje (DVR), el filtro de energía activo (AF), el acondicionador de calidad de energía unificado (UPQC), entre otros.

Sin embargo, la mayoría de estos dispositivos presentan algunas desventajas, entre las principales están los costos derivados de la instalación de equipos de almacenamiento de energía como el banco de baterías o capacitores y algunos dispositivos como el UPQC que solo inyecta potencia reactiva. Es por ello que en los últimos años ha surgido la necesidad de profundizar en el estudio del Restaurador Dinámico Voltaje (DVR), el cual proporciona una solución más efectiva en cuanto a los costos de inversión, además de buscar la posibilidad de inyectar potencia activa con paneles solares para tener una mejor regulación.

## 1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Ante el constante avance de la tecnología, los nuevos dispositivos digitales son más sensibles a perturbaciones en el sistema eléctrico de distribución, por lo que para su correcto funcionamiento se deben de cumplir ciertos requerimientos en la calidad de la energía, a tal grado que existen normas vigentes como la especificación CFE L0000-45 sobre las desviaciones permisibles de la onda de voltaje en el suministro de energía eléctrica. Las perturbaciones no solo causan daños a los equipos, sino que también causan pérdidas económicas a los usuarios así como también al suministrador de energía eléctrica.

Por lo anterior, surge la necesidad de compensar estas fluctuaciones de voltaje producidas por perturbaciones, y el dispositivo de energía personalizado que cumple con estas características es el restaurador dinámico de voltaje que se conecta en serie con la línea de distribución, y para ello se requiere estudiar los elementos que lo componen, así como implementar la topología más adecuada del convertidor de CD-CD, para que sea alimentado desde paneles solares, los cuales no producen ningún tipo de contaminación ambiental y requieren poco mantenimiento. Como resultado se obtendrá un dispositivo más eficiente con mayor profundidad de compensación cuya alimentación será independiente de la red de suministro eléctrico, y será capaz de mejorar la calidad de la energía. Además, esta topología servirá como punto de partida para el diseño y análisis de nuevos dispositivos de energía personalizados autosuficientes.

## 1.3. JUSTIFICACIÓN

Con la realización del presente proyecto se obtendrá un prototipo a nivel laboratorio de un Restaurador Dinámico de Voltaje en el cual se podrá observar los componentes que lo conforman y el funcionamiento de éste ante fallas de corta duración (sags o huecos de tensión) en el sistema de distribución. Con el uso de paneles solares se logrará tener una fuente de energía limpia y renovable, que no produce gases de efecto invernadero, son silenciosos, amigables con el medio ambiente y su costo de operación y mantenimiento es relativamente bajo, éstos paneles

serán utilizados para alimentar el dispositivo, sustituyendo los dispositivos de energía tradicionales (banco de baterías) con lo cual será un prototipo funcional mucho más económico para su construcción. El dispositivo podría utilizarse como punto de partida para la implementación de un DVR más eficiente dado que servirá para poder realizar pruebas y utilizarlo como equipo de laboratorio para proyectos futuros.

## **1.4. OBJETIVOS**

### **1.4.1. Objetivo general**

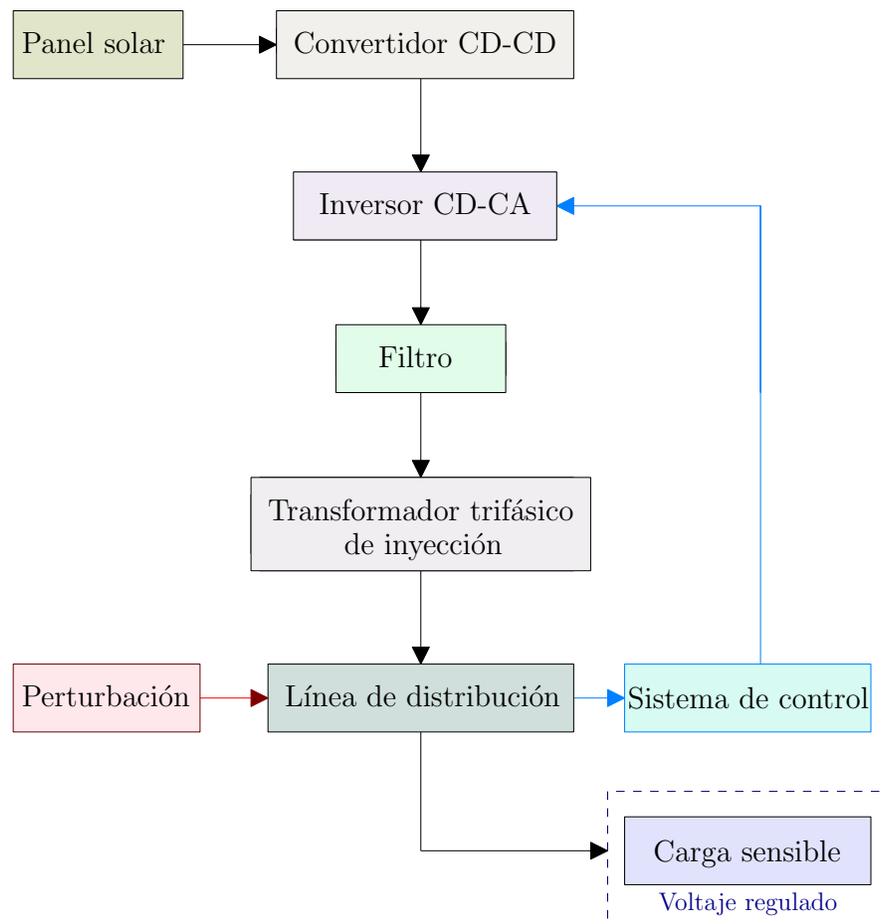
Diseñar un Restaurador Dinámico de Voltaje soportado por un arreglo fotovoltaico que sea capaz de compensar disturbios simétricos mediante la inyección de potencia activa.

### **1.4.2. Objetivos específicos**

- Analizar, diseñar y evaluar mediante simulación el convertidor estático de potencia de CD-CD para la conexión del panel solar.
- Dimensionar el transformador de inyección y el inversor de voltaje que se utilizará para el DVR.
- Diseñar el filtro LC que se conectará a la salida del convertidor CD-CA para eliminar las componentes no deseadas del voltaje de salida.
- Analizar y diseñar los circuitos de instrumentación para formar el lazo cerrado.
- Diseñar el controlador para el convertidor de CD-CD.

## 1.5. HIPÓTESIS

Mediante la implementación de la topología propuesta para el DVR, mostrada en el diagrama de bloques de la Figura 1.1, se logrará obtener una mejora en la regulación de voltaje en el sistema de distribución (simulado mediante Matlab/Simulink) ante perturbaciones de corta duración mejorando la calidad de la energía suministrada a la carga sensible.



**Figura 1.1:** Diagrama de bloques de la topología propuesta para en DVR.

## **1.6. ALCANCES Y LIMITACIONES**

### **1.6.1. Alcances**

- Evaluación numérica del diseño del DVR propuesto.
- Inyección de potencia activa al sistema ante disturbios de corta duración.
- Regulación de voltaje ante diferentes escenarios.
- Incorporación de paneles solares.
- Diseño de los controladores.

### **1.6.2. Limitaciones**

- El dispositivo DVR será alimentado desde un panel solar, por lo tanto, el dispositivo inyectará únicamente potencia activa para la compensación de voltaje.
- No se tendrá un dispositivo para el almacenamiento de energía para alimentar el DVR, en su lugar se conectará el panel solar considerándolo con operación ideal.
- El dispositivo DVR solo compensará huecos de tensión simétricos, por simplicidad del control.
- Validación del sistema en lazo cerrado completo ante perturbaciones simétricas.

# Capítulo 2

## Marco Teórico

En este capítulo se expone de manera general la teoría relacionada con el proyecto de investigación, partiendo del concepto de la calidad de la energía enfocada al sistema eléctrico de distribución (SED), se explican los problemas más comunes en este; huecos y elevaciones de tensión. Se define el concepto de un Restaurador dinámico de voltaje, así como las partes que lo conforman, su funcionamiento, y se analizan las diferentes topologías del DVR que aparecen en la literatura. Por último, se muestra el modelo matemático de una celda fotovoltaica y sus curvas características.

## 2.1. CALIDAD DE LA ENERGÍA

### 2.1.1. Definiciones de calidad de la energía

El concepto de calidad de la energía se ve desde varios aspectos. Desde la perspectiva del cliente un problema de calidad de la energía podría definirse como cualquier condición en el suministro eléctrico que cause inconvenientes con el funcionamiento de los electrodomésticos, equipo eléctrico y electrónico en general. Desde la perspectiva de la empresa suministradora un problema de calidad de la energía es percibido como incumplimiento en varios estándares como tensión RMS o armónicos. Pero el punto de vista más acertado es considerar la calidad de la energía como calidad de la tensión eléctrica [1].

Las empresas suministradoras de energía eléctrica deben proporcionar al cliente una onda de tensión que cumpla con los índices permisibles, pero la corriente de carga consumida por el usuario final, afecta el voltaje que interactúa con las impedancias del sistema y genera disturbios que generalmente no son del control de la compañía suministradora. Por ello es que la tensión o voltaje es la mejor medida de la calidad de la energía.

Una definición de calidad de la energía según Brown [1], es la siguiente:

*“La calidad de la energía es caracterizada por el suministro de una onda de tensión sin distorsión de la forma de onda, variación en su amplitud o en frecuencia”.*

La definición de la norma IEC 61000-4-30 indica que:

*“La calidad de la energía es un conjunto de características de la energía eléctrica en un punto dado del sistema eléctrico, evaluados contra un conjunto de parámetros técnicos de referencia”.*

Una definición adicional es presentada por la Asociación de Normalización y Certificación NMX-J-610/4-30-ANCE-2007 basada en la norma IEC:

*“Son las características de la energía eléctrica (tensión, corriente y sus relaciones) en función del tiempo y de la frecuencia en un punto dado del sistema eléctrico de potencia , que se evalúan contra las desviaciones permisibles que se utilizan como referencia en normas y reglamentos aplicables”.*

### **2.1.2. Factores que afectan la calidad de la energía.**

Existen múltiples factores de interés que afectan la calidad de la energía eléctrica, siendo los más importantes:

- Instalación de sistemas basados en electrónica de potencia que no solamente son sensibles a una mala calidad de la energía, sino que también causan perturbaciones que afectan al resto de consumidores.
- Instalación de cargas no lineales en instalaciones antiguas que no fueron diseñadas teniendo en cuenta los posibles problemas de calidad de la energía.
- Sistemas de protección inadecuados o inexistentes.

### **2.1.3. Disturbios en la calidad de la energía**

Un disturbio es una perturbación que hace que el voltaje o corriente del sistema no sea ideal. Existen varios tipos y se clasifican en base a su espectro armónico, a su duración y amplitud. A continuación, se analizan los disturbios o fallas de corta duración.

### **2.1.4. Variaciones de voltaje de corta duración**

Son aquellas variaciones en el suministro de voltaje que no exceden más de un minuto de duración. Se originan por las fallas de un sistema eléctrico y energización de grandes bloques de

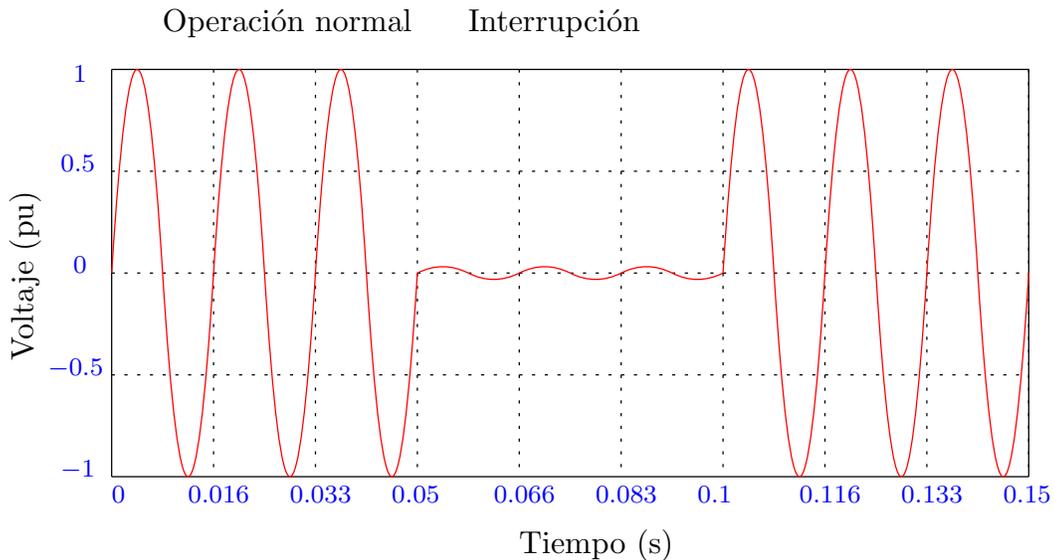
carga. Dependiendo de la localización de la falla y de las condiciones de operación del sistema, la falla puede ocasionar elevación de tensión (swell), huecos de tensión (sags) o una interrupción. En la Tabla 2.1 se puede observar el tiempo de duración de este tipo de fallas y la magnitud de voltaje típico en valores por unidad [2].

**Tabla 2.1:** Perturbaciones de corta duración según IEEE 1159.

Variaciones de corta duración	Duración típica	Magnitud típica de voltaje
<i>Instantánea</i>		
Interrupción	0.5-30 ciclos	<0.1 p.u
Sag	0.5-30 ciclos	0.1-0.9 p.u
Swell	0.5-30 ciclos	1.1-1.8 p.u
<i>Momentánea</i>		
Interrupción	30 ciclos-3 s	<0.1 p.u
Sag	30 ciclos-3 s	0.1-0.9 p.u
Swell	30 ciclos-3 s	1.1-1.4 p.u
<i>Temporal</i>		
Interrupción	3 s-1 min	<0.1 p.u
Sag	3 s-1 min	0.1-0.9 p.u
Swell	3 s-1 min	1.1-1.2 p.u

#### 2.1.4.1 Interrupciones

Se produce una interrupción cuando el voltaje de suministro o la corriente de carga disminuye a menos de 0.1 p.u por un periodo de tiempo que no excede 1 minuto. Las interrupciones pueden ser el resultado de fallas en el sistema de alimentación, fallas en el equipo y fallas en el control. Las interrupciones se miden por su duración, ya que la magnitud del voltaje siempre es inferior al 10% del valor nominal (Figura 2.1). La duración de una interrupción debido a una falla en el sistema de la red pública está determinada por el tiempo de funcionamiento de los dispositivos de protección de la red pública. El reenganche instantáneo generalmente limitará la interrupción causada por una falla no permanente a menos de 30 ciclos. El cierre tardío del dispositivo de protección puede causar una interrupción momentánea o temporal. La duración de una interrupción debido a un mal funcionamiento del equipo o conexiones sueltas puede ser irregular.



**Figura 2.1:** Interrupción de energía.

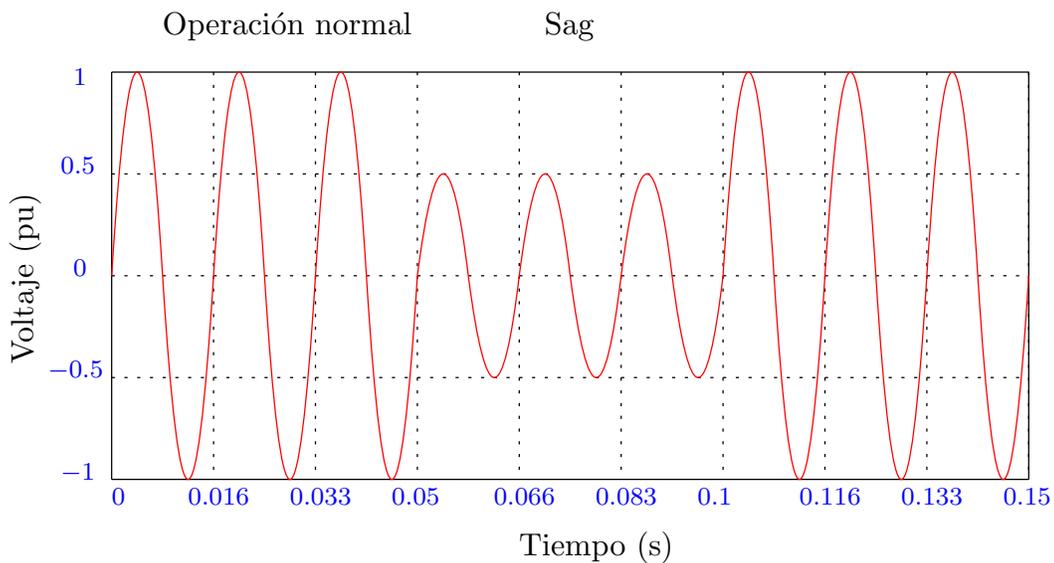
Algunas interrupciones pueden estar precedidas por una caída de voltaje cuando estas interrupciones se deben a fallas en la fuente del sistema. La caída de voltaje ocurre entre el momento en que se inicia una falla y el dispositivo de protección funciona.

#### 2.1.4.2 Huecos de tensión o “sags de voltaje”.

Un hueco de tensión o *sag* es una disminución de entre 0.1 y 0.9 p.u en rms de voltaje a la frecuencia de nominal durante tiempos de 0.5 ciclos a 1 min. La comunidad de calidad de energía ha usado el término *sag* durante muchos años para describir una disminución de voltaje de corta duración. Aunque el término no se ha definido formalmente, ha sido aceptado y utilizado cada vez más por empresas de servicios públicos, fabricantes y usuarios finales. La definición de IEC para este fenómeno es *hundimiento o depresión*.

Los sags de voltaje generalmente están asociados con fallas del sistema, pero también pueden ser causados por la activación de carga que demanda mucha corriente como por ejemplo el arranque de motores grandes (Figura 2.2). Hasta esfuerzos recientes, la duración de los sags de voltaje no se han definido claramente. La duración típica en algunas publicaciones esta en

un rango de 2 ms (aproximadamente una décima parte de un ciclo) a un par de minutos. Los tiempos típicos de eliminación de fallas varían de 3 a 30 ciclos, dependiendo de la magnitud de la corriente de falla y del tipo de protección contra sobrecorriente [3].



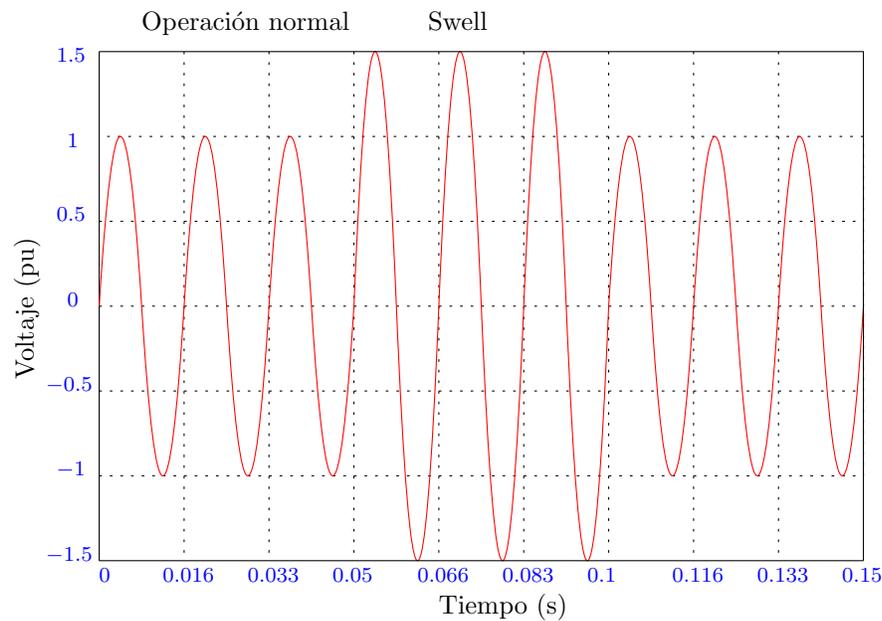
**Figura 2.2:** Hueco de tensión o sag de voltaje.

Las duraciones de los *sags* de voltaje se subdividen aquí en tres categorías; *instantáneas*, *momentáneas* y *temporales*, que coinciden con las tres categorías de las interrupciones y elevaciones de tensión o *swells*. Estas duraciones están destinadas a corresponder a los tiempos de operación típicos de los dispositivos de protección de servicios públicos, así como a las divisiones de duración recomendadas por las organizaciones técnicas internacionales.

#### 2.1.4.3 Elevaciones de tensión o “swell”.

Una elevación de tensión o *swell* se define como un aumento de entre 1.1 y 1.8 pu en el voltaje rms a la frecuencia del sistema durante tiempos de 0.5 ciclos a 1 min. Al igual que con los *sags* de tensión, los *swells* generalmente se asocian con condiciones de falla del sistema, pero no son tan comunes como los *sags* de voltaje. Una forma en que se puede producir es por el aumento temporal de voltaje en las fases sin falla durante una falla de una sola línea a tierra. La Figura 2.3 ilustra la forma de onda del voltaje al ocurrir un *swell* de voltaje. Los

swells también pueden ser causados por; apagar una carga grande, cortocircuitos, fenómenos de resonancia y ferroresonancia, estos pueden resultar durante fallas de fase a tierra, instante en que puede acontecer una elevación en las fases libres de falla, o también al energizar un banco de condensadores [3].



**Figura 2.3:** Forma de onda del voltaje al ocurrir un swell.

Los efectos de los swell son:

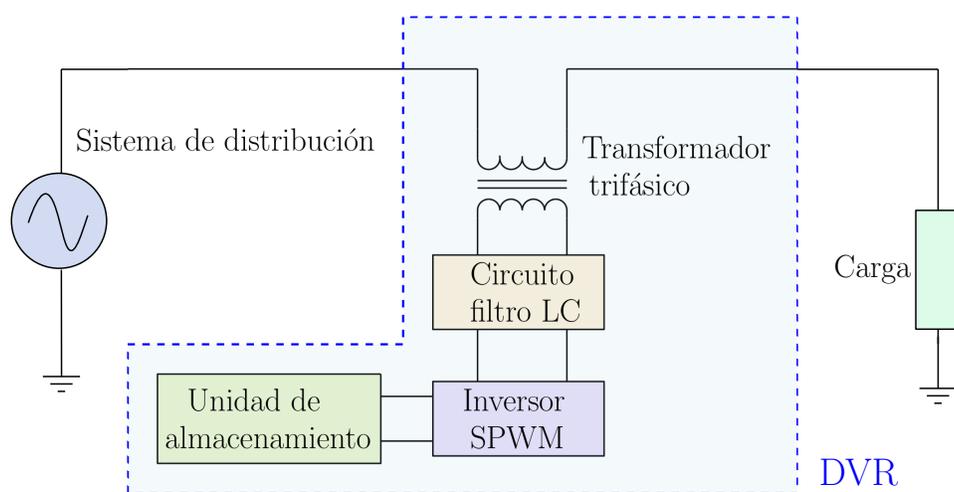
- Falla en los componentes de un equipo según la frecuencia de incidencia del evento.
- Reducción de la vida útil de todo tipo de cargas y de los dispositivos electrónicos.
- Operación indeseada de las protecciones y degradación de algunos de estos dispositivos.
- Incremento de luz visible en algunos tipos de lámparas.

## 2.2. EL RESTAURADOR DINÁMICO DE VOLTAJE (DVR)

El Restaurador Dinámico de Voltaje (DVR) es un dispositivo conectado en serie con las líneas de alimentación que se utiliza para la compensación de voltaje en cargas sensibles a perturbaciones en la red de potencia; los DVR ofrecen protección contra sags, swells y distorsiones de la forma de onda de voltaje. Funcionalmente, los DVR se basan en un inversor de voltaje basado en modulación de ancho de pulso (VSI-PWM) que es capaz de generar o absorber potencia real o activa independientemente de las condiciones del voltaje de CA presente en su salida; para ello, inyecta niveles de voltaje CA en serie y en sincronismo con las tensiones de alimentación provenientes de la red de distribución [4].

### 2.2.1. Partes que conforman un DVR

El circuito de potencia de un DVR se muestra en la Figura 2.4, donde se puede observar que, en general, los DVR constan de un transformador de inyección conectado en serie con la línea de distribución, un puente inversor de voltaje PWM conectado al secundario del transformador de inyección a través de un circuito de filtrado y un dispositivo de almacenamiento de energía conectado en el enlace de CD del inversor [5].



**Figura 2.4:** Diagrama básico de un DVR.

El transformador de inyección es un transformador trifásico conectado a la línea de distribución en configuración delta/abierto (permitiendo secuencias de voltaje positivas y negativas) o estrella/abierto (de forma de permitir secuencias de voltaje positivas, negativas y cero), donde el lado de alta tensión se halla conectado a las líneas de distribución y el lado de baja tensión de encuentra conectado a la salida del circuito de filtrado. Tal circuito de filtrado consta de filtros pasivos que se utilizan para filtrar los armónicos de alta frecuencia introducidos por las frecuencias de trabajo del inversor, pudiendo ser colocados en el lado de alta tensión o de baja tensión de acuerdo a la conveniencia del diseño de los circuitos y algoritmos de control y del propio circuito de filtrado.

El circuito inversor se compone de un puente de dispositivos semiconductores (GTO o IGBT) cuya modulación de los instantes de encendido y apagado genera la tensión que se inyecta a la línea de distribución para compensar en la carga las variaciones de amplitud, fase y frecuencia que se pudieran presentar en la alimentación; la técnica de modulación utilizada se basa en la modulación de ancho de pulso, entendiéndose que la fidelidad del voltaje de salida depende del comportamiento dinámico del esquema de control del PWM.

Finalmente, la unidad de almacenamiento de energía se encarga de proveer la energía suministrada a la carga en el momento de ocurrir una perturbación en la red de alimentación, pudiendo utilizarse baterías, circuitos compensadores, capacitores o almacenadores de energía super magnéticos para proveer compensación de potencia real, la cual es esencial cuando ocurren sags de duración prolongada.

### **2.2.2. Principio de funcionamiento del DVR**

En caso de una perturbación de tensión en la red de alimentación eléctrica, el convertidor electrónico de potencia (inversor) inyecta el voltaje apropiado que se requiere para compensar tal perturbación, tal como se ve en la Figura 2.5b donde  $V_{\text{pre-sag}}$  es el voltaje en la red de alimentación antes de la ocurrencia del sag,  $V_{\text{sag}}$  es el voltaje que se presenta en la red en el

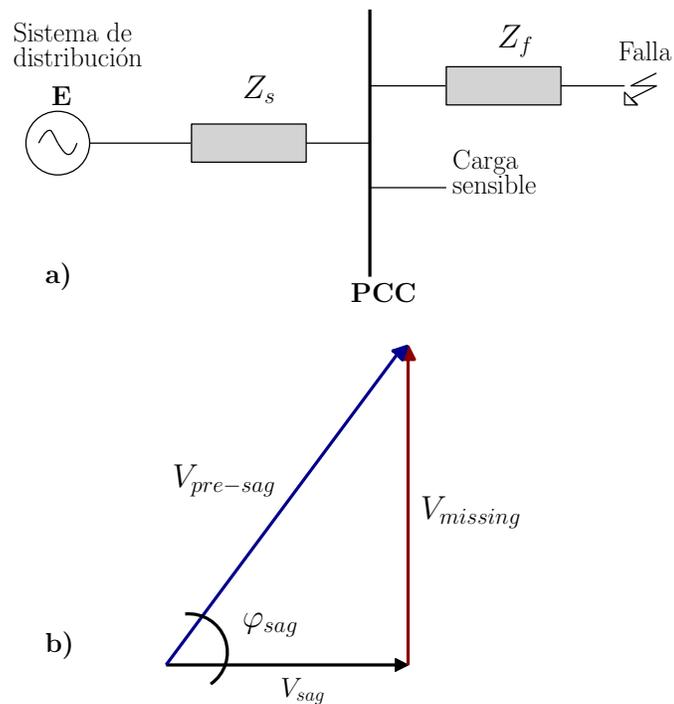
momento de aparición del sag y  $V_{\text{missing}}$  es el voltaje que debe ser compensado por el restaurador dinámico de voltaje (DVR). Por lo general, los sags de voltaje son causados por fallas en las líneas de distribución, tal como se muestra en la Figura 2.5a. Durante la ocurrencia del sag el voltaje en el punto de acoplamiento común (PCC) la magnitud y fase del voltaje  $V_{\text{sag}}$  quedan determinadas por las impedancias de la línea que falla y la impedancia de la fuente:

$$V_{\text{sag}} = E \frac{Z_f}{Z_f + Z_s} \quad (2.1)$$

donde  $V_{\text{sag}}$  es el voltaje durante el sag en el PCC,  $E$  es el voltaje suministrado por la fuente,  $Z_s$  es la impedancia de la fuente de tensión (generalmente la del transformador de distribución) y  $Z_f$  es la impedancia de la línea que falla. Como se observa, para mantener la fase y la magnitud del voltaje aplicado a la carga antes del sag se debe compensar el voltaje aplicado por el DVR tanto en magnitud como en fase. Debido a esto, la técnica de control adoptada va a depender de la sensibilidad de la carga a ser protegida con respecto a variaciones de magnitud y fase.

El control *in-phase boosting* puede aplicarse a cargas relativamente insensibles a pequeñas variaciones en la fase de la tensión aplicada; utilizando este método de control el DVR inyecta una tensión en fase con la tensión presente anterior a la ocurrencia del sag, con lo cual se aumenta la cantidad de potencia activa que requiere suministrar el DVR además de introducir un pequeño cambio de fase visible desde el punto de vista de la carga.

El tipo de control *pre-sag compensation* busca compensar la fase del voltaje visto por la carga, de forma tal que disminuye la cantidad de potencia activa que debe inyectar el DVR y es capaz de compensar cambios de magnitud y fase durante la ocurrencia de un sag. Existe también una tercera técnica de control conocida como *energy optimization*, donde además de mantener la magnitud y fase de la tensión desde el punto de vista de la carga, emplea algoritmos de control que permiten minimizar la cantidad de energía activa que inyecta el DVR, con lo cual se obtienen unidades de almacenamiento de energía con elementos más pequeños, baratos y de



**Figura 2.5:** Origen de los sags de voltaje.

mayor tiempo de autonomía [4].

### 2.2.3. Topologías del DVR

Conceptualmente los DVR operan para mantener en su valor nominal el voltaje en la carga. Durante el hueco de tensión, el DVR inyecta voltaje en serie para restaurar los voltajes de suministro, en este modo de operación el DVR intercambia potencia activa y reactiva con el sistema. Para que se logre el flujo de potencia activa del DVR hacia la carga, es necesaria la conexión de una fuente de energía en las terminales de CD del convertidor VSI (Voltage Source Injection). En base a la fuente de energía utilizada, se pueden considerar dos configuraciones generales para el DVR: una en la que se utiliza un sistema de almacenamiento de energía, y la segunda que emplea la misma energía del sistema.

Como unidad de almacenamiento de energía se pueden utilizar diferentes tipos de dispositivos y sistemas de almacenamiento tales como baterías, capacitores, o SMES (superconducting

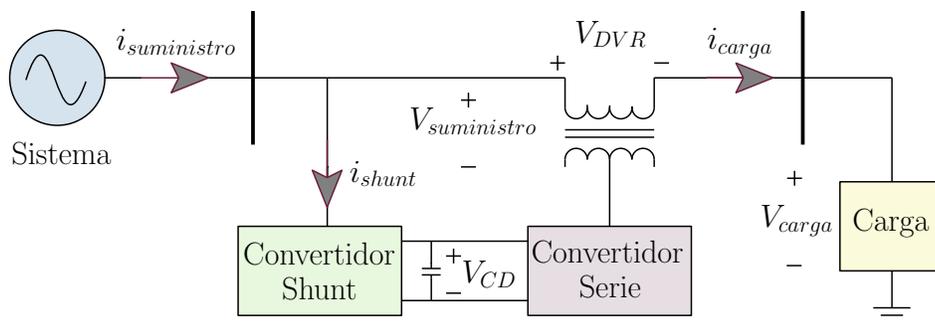
magnetic energy storage). En la topología que no utiliza unidad de almacenamiento, el DVR toma la energía necesaria para la compensación del mismo sistema eléctrico durante el hueco de tensión. A continuación se muestran las cuatro topologías más comunes [6].

### 2.2.3.1 Topología sin almacenamiento de energía.

Las topologías que no utilizan almacenamiento de energía basan su operación en el hecho de que parte del voltaje de suministro permanece en el sistema durante el hueco de tensión, y ese voltaje remanente puede utilizarse para proveer la energía de compensación requerida para mantener el voltaje en la carga en su valor nominal. Sin embargo, este enfoque tiene el inconveniente de que el sistema de compensación demanda más corriente del sistema durante la falla, haciendo que las cargas conectadas en otros puntos del sistema vean una caída de voltaje más pronunciada.

#### Sistema 1:

La energía para el enlace de CD es tomada del sistema de suministro a través de un convertidor pasivo conectado en paralelo en el lado de suministro (Figura reffig2.6).



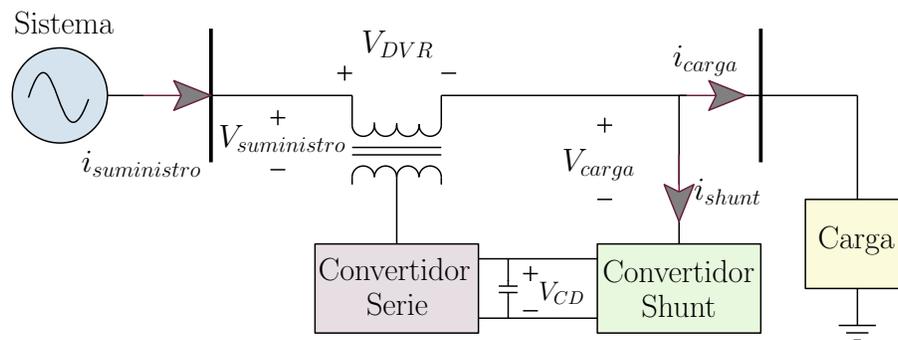
**Figura 2.6:** DVR sin almacenamiento de energía, con un convertidor shunt en el lado de suministro.

Por otro lado, mediante esta configuración se tiene la ventaja de poder compensar el hueco de tensión de larga duración, además de reducir el costo del sistema de almacenamiento de energía. En particular, cuando se conecta el DVR a una red robusta, la energía de compensación necesaria para la carga se puede obtener fácilmente al incrementar el flujo de corriente hacia

el convertidor shunt e inyectando el voltaje faltante a través del inversor serie. Al requerir de un flujo unidireccional en el enlace de CD, el convertidor pasivo en paralelo es una solución efectiva y de bajo costo. Las topologías con este tipo de sistema se clasifican de acuerdo a la localización del convertidor shunt.

### Sistema 2:

La energía para el enlace de CD es tomada del sistema de suministro a través de un convertidor pasivo conectado en paralelo en el lado de la carga, Figura 2.7.



**Figura 2.7:** DVR sin almacenamiento de energía, con un convertidor shunt en el lado de la carga.

### 2.2.3.2 Topología con almacenamiento de energía.

Estas topologías utilizan un medio para el almacenamiento de energía como por ejemplo un banco de baterías de las cuales se obtiene la energía para suplir los huecos de tensión provocados por los sags de voltaje, o también se pueden utilizar otros medios como un banco de capacitores que a diferencia de las baterías el tiempo de compensación de voltaje se reduce de manera considerable.

### Sistema 3:

Sistema con unidad de almacenamiento de energía y voltaje variable en el enlace de CD, Figura 2.8.

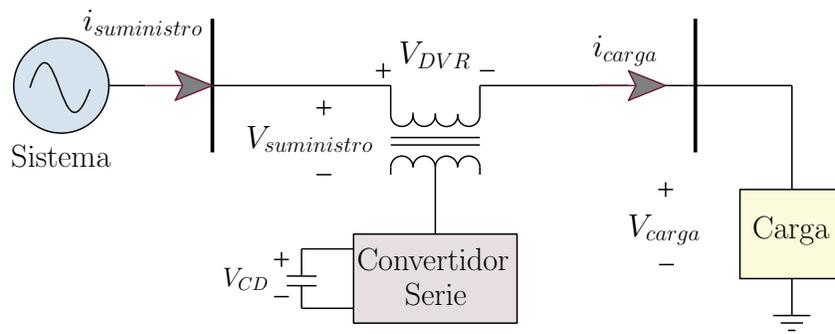


Figura 2.8: DVR con almacenamiento de energía y con voltaje de CD variable.

**Sistema 4:**

Sistema con un sistema externo de almacenamiento de energía conectado al enlace de CD controlable, en el cual se mantiene un voltaje constante, Figura 2.9.

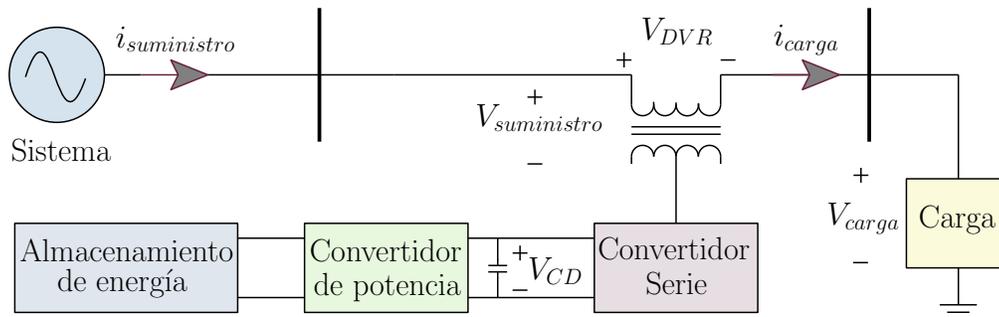


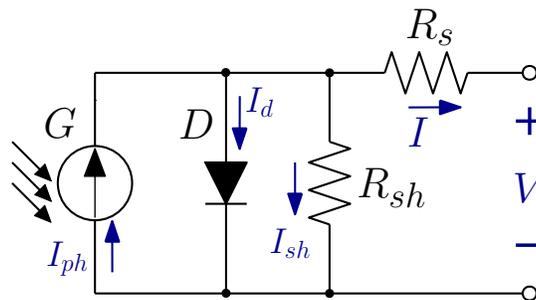
Figura 2.9: DVR con almacenamiento de energía y con voltaje de CD constante.

### 2.3. SISTEMAS DE GENERACIÓN PV

La necesidad de utilizar fuentes de energía alternas ha ido en aumento a lo largo de los últimos años, una de las energías renovables más predominantes es la solar, la cual es captada por paneles PV cuya función es transformar el tipo de energía incidente en energía eléctrica útil para el consumidor final. A continuación, se describe de manera general el funcionamiento de un panel PV así como el modelo matemático.

### 2.3.1. Modelo matemático de un panel PV

Los paneles PV están constituidos por un arreglo de celdas solares fabricadas con un material semiconductor, comúnmente silicio. También, existen celdas construidas de otros materiales como el arseniuro de galio, fosforo de galio-indio, telururo de cadmio y grafeno por mencionar algunos. Sin embargo, el silicio es el elemento más preferido por sus características de absorción y por ser de costo accesible. Cuando la energía solar incide sobre una celda, se genera una corriente proporcional a la irradiancia debido al efecto fotovoltaico. La irradiancia solar ( $G$ ) es la potencia de radiación solar por unidad de área incidente en una superficie. Sus unidades en el S.I. son  $W/m^2$ .



**Figura 2.10:** Modelo eléctrico de una celda PV.

Para analizar el comportamiento de una celda PV en un circuito es conveniente emplear un modelo equivalente [7]. La corriente fotogenerada  $I_{ph}$  puede ser modelada con un generador de corriente mientras que la corriente de oscuridad (o corriente del diodo)  $I_d$  puede ser representada con un diodo como se muestra en la Figura 2.10. La resistencia en serie  $R_s$  incluida en el modelo representa la resistencia equivalente debido a los contactos metálicos con el semiconductor, a las capas semiconductoras y a la malla de metalización resultantes de la fabricación de la estructura de una celda PV. La resistencia en derivación o paralelo  $R_{sh}$  representa las fugas de corriente en los bordes de la celda, los posibles cortos circuitos metálicos y la recombinación favorecida en las fronteras de grano del cristal. En general, la resistencia en paralelo toma valores suficientemente altos como para que su influencia en el funcionamiento global sea baja, y de ahí que frecuentemente se desprece su contribución.

El modelo de una celda PV posee características no lineales. La corriente generada depende de distintos parámetros como se puede observar en (2.2)-(2.6). En la Tabla 2.2 se especifican los parámetros empleados en el modelo de una celda solar, así como sus unidades.

$$I = I_{ph}N_p - I_d - I_{sh} \quad (2.2)$$

$$I_{ph} = G_k[I_{sc} + k_1(T_{op} - T_{ref})] \quad (2.3)$$

$$I_d = [e^{\frac{(V+IR_s)}{(nV_TCN_s)}} - 1]I_sN_p \quad (2.4)$$

$$I_{sh} = \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (2.5)$$

$$I_s = I_{rs} \left( \frac{T_{op}}{T_{ref}} \right)^3 e^{\left[ \frac{qE_g}{nk} \left( \frac{1}{T_{op}} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right]} \quad (2.6)$$

**Tabla 2.2:** Parámetros del modelo del panel PV.

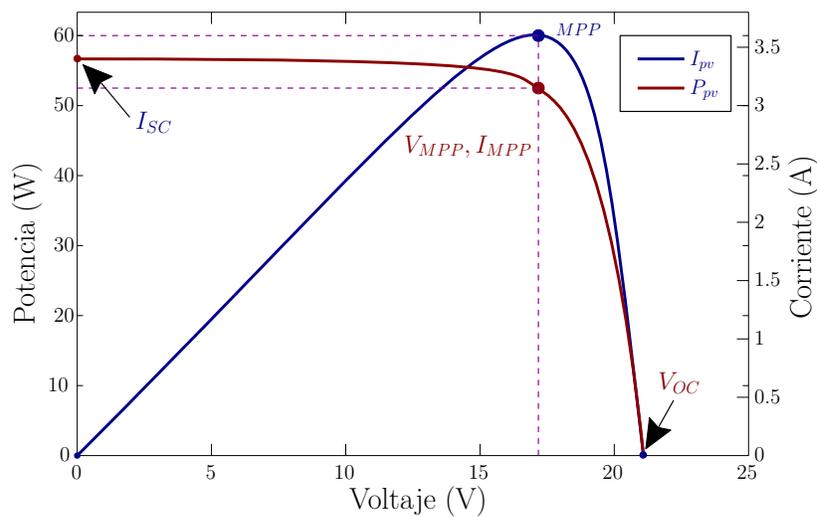
	Parámetro	Unidad
$I$	Corriente de salida del panel PV	A
$I_{ph}$	Corriente fotogenerada	A
$N_s$	Número de paneles en serie	—
$N_p$	Número de paneles en paralelo	—
$G_k$	Coefficiente de irradiancia solar $\frac{G}{G_{ref}}$	—
$I_{sc}$	Corriente de corto circuito	A
$k_1$	Coefficiente de temperatura de la corriente de corto circuito	—
$T_{op}$	Temperatura de operación de la celda	°C
$T_{ref}$	Temperatura de la celda a 25°C	°C
$V$	Voltaje de salida del panel PV	V
$R_s$	Resistencia en serie	Ω
$R_{sh}$	Resistencia en derivación o paralelo	Ω
$G$	Irradiancia incidente sobre el panel	$\frac{W}{m^2}$
$n$	Factor de idealidad del diodo	—

### 2.3.2. Curva característica de un panel PV

En la Figura 2.11 se observa la curva característica de un panel PV que tiene un comportamiento no lineal bajo condiciones de temperatura e irradiancia constantes [8]. La curva característica de un panel PV se obtiene al conectar una resistencia de carga variable en las terminales del panel, obteniendo un par de valores de voltaje y corriente asociados al valor de la carga. Existe un único punto de operación llamado MPP en el cual la potencia generada es máxima. El MPP a su vez corresponde al producto de un voltaje  $V_{MPP}$  y una corriente  $I_{MPP}$ . La potencia entregada por la celda en este punto será la considerada como potencia nominal  $P_{max}$ . Las unidades de esta potencia son watts pico ( $W_p$ ).

La potencia generada por el panel PV está dada por (2.7):

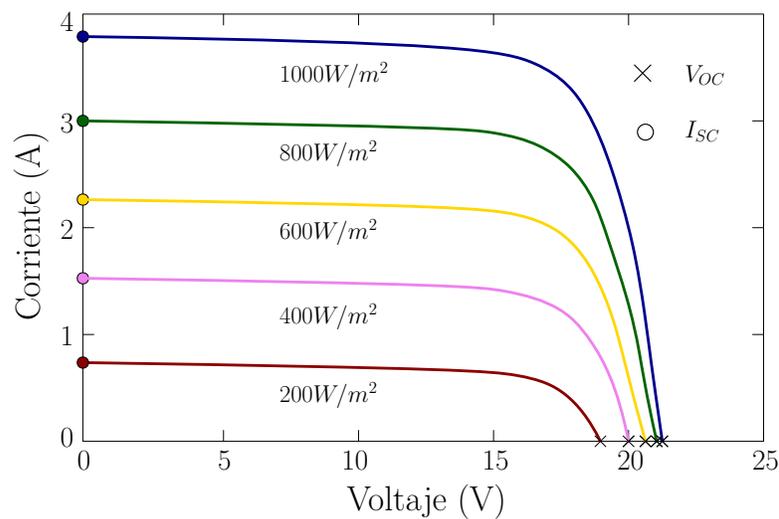
$$P_{pv} = (V_{pv})(I_{pv}) \quad (2.7)$$



**Figura 2.11:** Curva característica de un panel PV.

### 2.3.3. Efectos de la irradiancia y la temperatura

El voltaje y la corriente generados en una celda dependen directamente de la iluminación recibida. El cambio de la corriente de cortocircuito  $I_{sc}$  de la célula es directamente proporcional al incremento de la irradiancia como se muestra en la Figura 2.12. Además, se puede ver que el voltaje de circuito abierto  $V_{oc}$  tiene una variación poco significativa con respecto al cambio de la irradiancia [9].

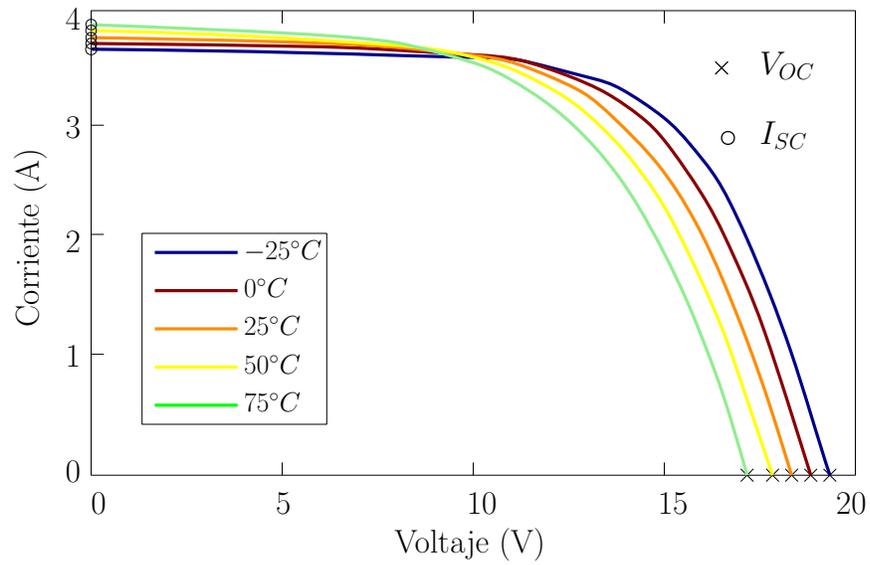


**Figura 2.12:** Efecto de la irradiancia en un panel PV.

Por otro lado, la temperatura afecta de manera considerable el voltaje  $V_{oc}$ , tal y como muestra la Figura 2.13.

## 2.4. CONCLUSIÓN

En este capítulo se presentó la información más relevante correspondiente al trabajo de investigación, definiendo en un principio los principales problemas que afectan la calidad de la energía en el sistema de distribución. Se describió el DVR como un dispositivo para mejorar la calidad de la energía, así como su principio de funcionamiento y las topologías que pueden ser



**Figura 2.13:** Efecto de la temperatura en un panel PV.

implementadas según se requiera. Una descripción general de los paneles solares fue introducida.

## **Capítulo 3**

# **Funcionamiento general del DVR soportado con paneles solares**

El presente capítulo tiene como objetivo describir detalladamente el diseño y funcionamiento del DVR soportado por paneles solares mediante simulación. Se expone la topología utilizada para el DVR utilizando como fuente de energía paneles solares para la inyección de potencia activa al sistema de distribución ante disturbios que afecten a una carga sensible, además se describe detalladamente las partes del sistema, así como el dimensionamiento y su respectiva simulación en Simulink/MATLAB, primero en lazo abierto y por último el sistema en lazo cerrado.

### **3.1. TOPOLOGÍA PROPUESTA**

El diagrama esquemático de Figura 3.1 muestra la topología propuesta en este trabajo de investigación, este sistema está compuesto por los siguientes elementos; un sistema trifásico de corriente alterna que alimenta a una carga sensible (sistema de distribución), una fuente de energía renovable (panel PV) que proporciona potencia activa, un convertidor estático de potencia CD-CD para elevar y estabilizar el voltaje del panel PV, un inversor de voltaje trifásico para generar el voltaje de compensación al momento del disturbio, un filtro pasa bajas para atenuar las señales de alta frecuencia producidas por la rápida conmutación de los interruptores del inversor, un transformador trifásico de inyección para inyectar o extraer el voltaje faltante en serie con la línea al momento de una perturbación, una carga de prueba que se considera lo suficientemente grande para provocar una caída de tensión en el punto común de acoplamiento (PCC), esta carga es controlada por el interruptor SW1 para simular una perturbación en el sistema, y por último un sistema de control para el inversor como para el convertidor CD-CD se encuentra implícito en el esquema.

En las siguientes secciones se describirán cada una de las partes que componen el DVR de forma más detallada, comprobando su funcionamiento mediante simulación en lazo abierto.

### **3.2. DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN**

El diagrama esquemático de la Figura 3.2 muestra un sistema de distribución (SED) en baja tensión. Nótese que las tres partes más importantes que conforman este sistema son; una fuente de voltaje trifásica que generalmente proviene de una subestación eléctrica (suministrador de energía eléctrica), los alimentadores o cables conductores para transportar la energía que al ser metálicos o con aleaciones estos presentan una impedancia a lo largo de la línea y por último una carga a la cual se le suministra energía eléctrica la cual es considerada el usuario final.

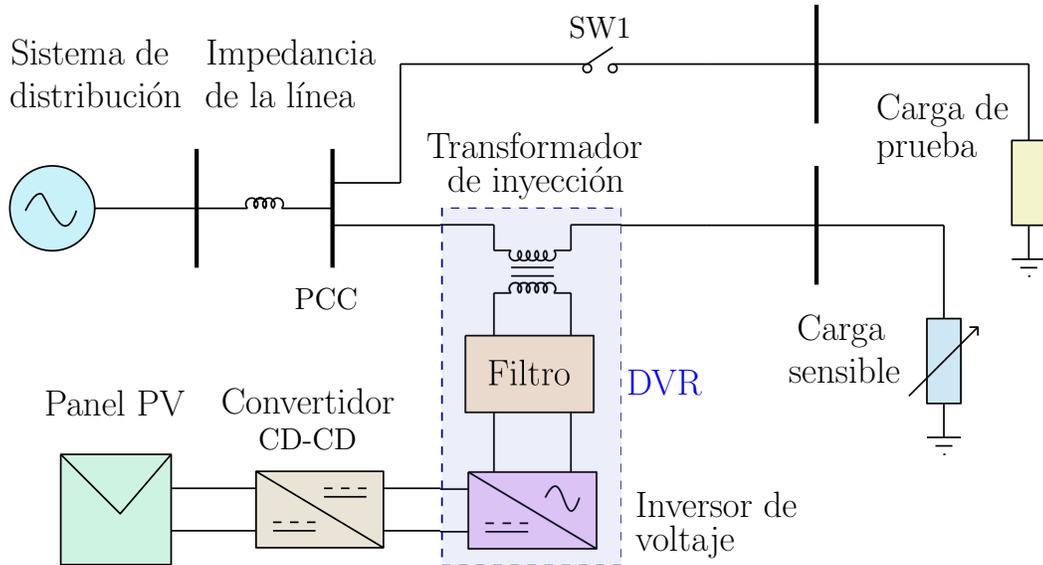


Figura 3.1: Topología del DVR propuesta.

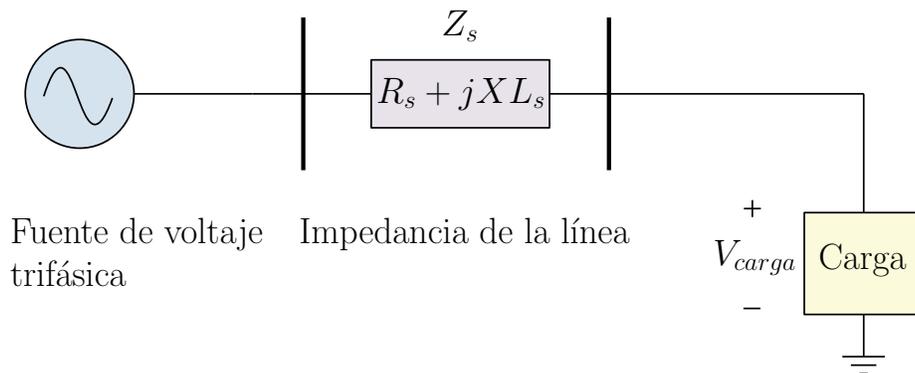


Figura 3.2: Diagrama esquemático del SED.

Para facilitar el análisis posterior del DVR es necesario fijar desde un inicio los parámetros del SED. En esta tesis se propusieron algunos valores de los parámetros que se muestran en la Tabla 3.1.

**Tabla 3.1:** *Parámetros propuestos para el SED.*

Parámetro	Símbolo	Valor
Voltaje del sistema	$V_s$	220 V
Frecuencia	$f_s$	60 Hz
Potencia activa de carga	$P_{carga}$	1 kW
Factor de potencia	$fdp$	0.8(-)
Resistencia de la línea	$R_s$	0.515 $\Omega$
Inductancia de la línea	$L_s$	1.945 mH

En base a los datos de la Tabla 3.1 se puede calcular la impedancia de carga (Figura 3.3), cabe mencionar que esta carga trifásica balanceada está conectada en estrella y es del tipo RL que es más común encontrar a nivel industrial, los parámetros eléctricos en la carga se calculan a continuación de acuerdo a [10];

$$V_f = \frac{V_s}{\sqrt{3}} = \frac{220V}{\sqrt{3}} = 127 V$$

$$\theta = \arccos(0.8) = 36.86^\circ$$

$$I_f = \frac{P_{carga}}{3V_f \cos(\theta)} = 3.28 A$$

$$Q_{carga} = 3V_f I_f \sin(\theta) = 750 VAR$$

$$S_{carga} = 3V_f I_f = 1250 VA$$

$$|Z_L| = \frac{V_f}{I_f} = 38.72 \Omega$$

$$\therefore Z_L = |Z_L| \cos(\theta) + j|Z_L| \sin(\theta) = 30.9760 + j23.2320 \Omega$$

$$\implies Z = R + jXL$$

$$\implies XL = 2\pi fL = \omega L$$

$$\implies \omega L = \text{imag}(Z_L)$$

$$\therefore R = \Re(Z_L) = 30.976 \Omega$$

$$\therefore L = \frac{\Im(Z_L)}{377} = 0.0616 H$$

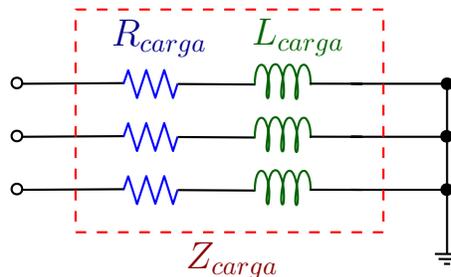


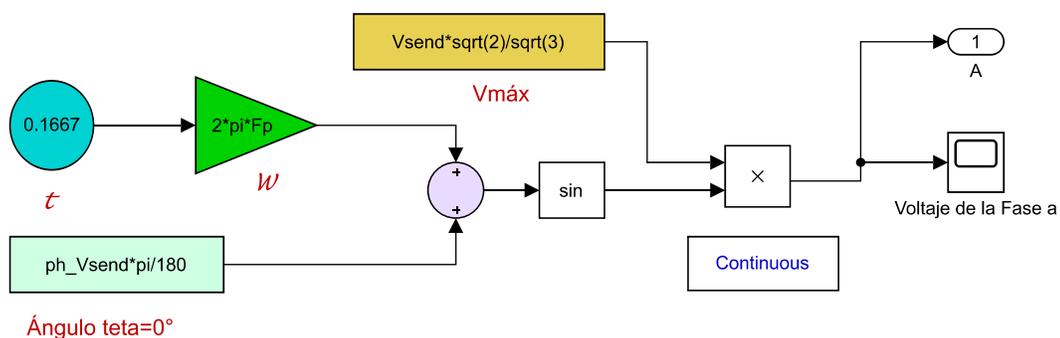
Figura 3.3: Carga RL trifásica balanceada

### 3.2.1. SED implementado en Simulink/MATLAB

Realizar simulaciones de sistemas que se diseñan es indispensable antes de realizar pruebas reales con estos, principalmente porque mediante simulación con software se pueden hacer mo-

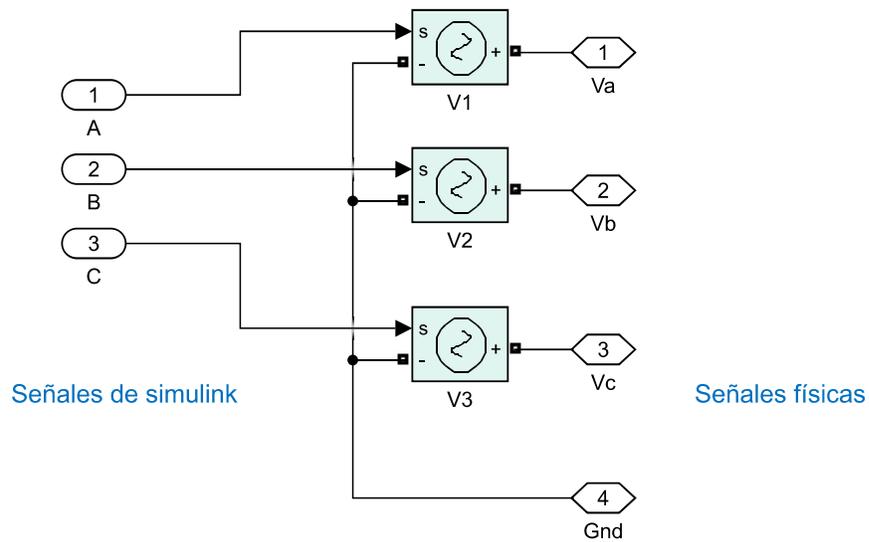
dificaciones en el sistema en todo momento sin correr el riesgo de dañar dispositivos electrónicos y evitar así pérdidas económicas por material o equipo, además de tener la facilidad de agregar infinidad de elementos que se requieran en el proceso para mejorarlo y observar su comportamiento. Para este trabajo de tesis se utilizó un software dedicado a la ingeniería por excelencia; MATLAB. Particularmente una herramienta que contiene MATLAB es Simulink en la cual se pueden realizar, entre otros ámbitos, simulaciones de sistemas físicos mediante modelos y bloques predeterminados en este entorno.

Para generar un voltaje trifásico en Simulink es necesario utilizar componentes que se incluyen dentro de sus librerías, en este caso se utilizó la librería *Simscape/Power Systems/Specialized Technology/Fundamental Blocks* para generar las señales senoidales defasadas  $120^\circ$  que conforman las señales trifásicas de voltaje de suministro del SED. En la Figura 3.4 se observa el diagrama de bloques implementado en simulink para obtener una señal senoidal que corresponde a la fase *a* de la fuente de voltaje, para generar las señales de las fases *b* y *c* solo se modifica el valor del ángulo  $\theta$  en el bloque correspondiente con los valores de  $-120^\circ$  y  $120^\circ$  respectivamente.



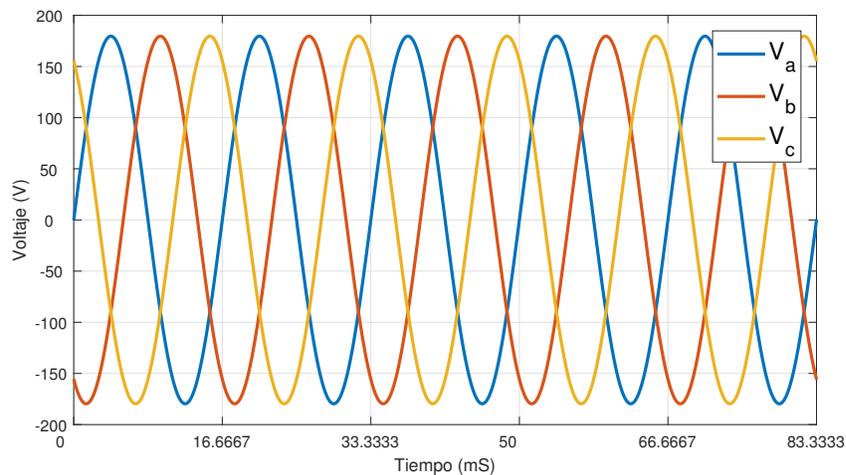
**Figura 3.4:** Diagrama de bloques en Simulink de la Fase a.

Las tres señales senoidales defasadas  $120^\circ$  generadas después deben ser convertidas en un voltaje equivalente para obtener una fuente de voltaje trifásica (señales físicas), para ello se utiliza el bloque *Controlled Voltage Source* para cada señal, que genera un voltaje en función de la señal de entrada a este bloque (Figura 3.5).



**Figura 3.5:** Conversión de señales de Simulink a Voltaje.

Finalmente las formas de onda del voltaje trifásico de la fuente de suministro del SED se muestra en la Figura 3.6 donde se observa las tres ondas senoidales defasadas  $120^\circ$  de igual frecuencia y amplitud para un tiempo de simulación de 5 ciclos.



**Figura 3.6:** Voltaje trifásico de suministro.

Teniendo el suministro de energía (voltaje trifásico de corriente alterna), es necesario tomar

en cuenta la impedancia de la línea de distribución debido a los conductores que transportan la energía eléctrica desde el suministro hasta la carga. Esta impedancia puede ser representada por una resistencia y una inductancia en serie tal como se muestra en la Figura 3.3 para cada fase. De igual forma la carga RL puede ser simulada, el bloque para incluir una resistencia e inductancia en serie en Simulink se llama *Series RLC Branch*. Cabe señalar que la carga RL esta en conexión estrella.

El diagrama de bloques simplificado en Simulink para simular un SED se observa en la Figura 3.7. En este diagrama se colocó un bloque de medición, con el cual se mide el voltaje y la corriente que demanda la carga sensible desde la fuente de voltaje.

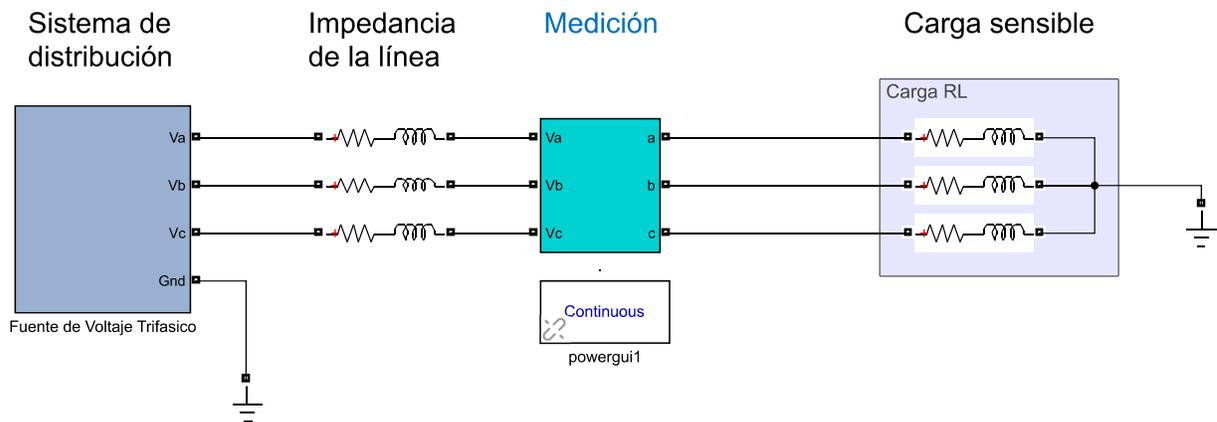


Figura 3.7: Diagrama de bloques del SED en Simulink.

### 3.3. EL PANEL SOLAR

Los paneles solares son la fuente de energía para el DVR propuesto en este proyecto. Estos paneles transforman la energía del sol en forma de luz a energía eléctrica, y la potencia producida depende directamente de dos factores ambientales muy importantes; la temperatura y la irradiancia a la que estén expuestos estos dispositivos. Los paneles solares utilizados en este proyecto de acuerdo a las limitaciones expuestas anteriormente se establecen que operen de forma

ideal, es decir, que estos operen con un valor de irradiancia de  $1000 \text{ W/m}^2$  y a una temperatura de  $25^\circ\text{C}$ . Teniendo esto en cuenta, la única limitante para extraer la máxima potencia de los paneles será el valor de impedancia conectada a estos [11]. En esta sección y para fines de estudio se utiliza solo un panel solar cuyos parámetros eléctricos se muestran en la Tabla 3.2

**Tabla 3.2:** Parámetros del panel PV utilizado para simulación.

Parámetro	Símbolo	Valor
Potencia máxima	$P_{\text{mpp}}$	80 W
Voltaje a potencia máxima	$V_{\text{mpp}}$	18.23 V
Corriente a potencia máxima	$I_{\text{mpp}}$	4.38 A
Voltaje de circuito abierto	$V_{\text{oc}}$	21.96 V
Corriente de cortocircuito	$I_{\text{sc}}$	4.69 A

### 3.3.1. Panel PV conectado a una resistencia de carga fija

Como se mencionó anteriormente la única limitante para poder extraer la máxima potencia de un panel es conectar el valor de carga adecuado cuya impedancia sea igual a la impedancia del panel. Utilizando un solo panel con parámetros de la Tabla 3.2, se puede calcular la impedancia aproximada de este panel de  $80 \text{ Wp}$  mediante la ley de ohm:

$$Z_{\text{panel}} = \frac{V_{\text{mpp}}}{I_{\text{mpp}}} = \frac{18.23\text{V}}{4.38\text{A}} = 4.16\Omega \quad (3.1)$$

El valor de carga resistiva para este panel en específico debe ser de  $4.16 \Omega$  para que se obtenga la máxima potencia. En la Figura 3.8 se observa el diagrama esquemático de una resistencia de carga fija de valor calculado anteriormente conectada a un panel solar operando de forma ideal.

Para realizar la simulación en Simulink de esta conexión Panel-Resistencia y comprobar que con el valor de resistencia calculado se extrae la máxima potencia del panel, se utilizó un modelo de panel PV llamado “PV array” de la librería *Simscape/Power Systems/Specialized*

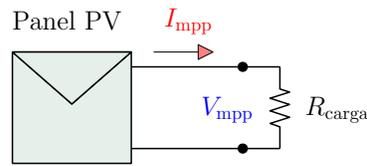


Figura 3.8: Panel PV con  $R_{carga}$  fija.

*Technology/Renewables/solar*. En este bloque que simula el modelo matemático de un panel PV se deben introducir los parámetros eléctricos del panel tales como: la potencia máxima o pico ( $P_{mpp}$ ), el voltaje de circuito abierto ( $V_{oc}$ ), el voltaje en el punto de máxima potencia ( $V_{mpp}$ ), número de celdas por módulo ( $N_{cell}$ ), corriente de cortocircuito ( $I_{sc}$ ), corriente en el punto de máxima potencia ( $I_{mpp}$ ) y además el coeficiente de temperatura a circuito abierto y el coeficiente de temperatura de cortocircuito, todos estos parámetros se pueden encontrar en la hoja de datos proporcionada por el fabricante del panel PV. En la Figura 3.9 se observa el bloque del panel PV en Simulink “PV array” el cual alimenta una carga fija del tipo resistiva. Cabe mencionar que en todo momento se considera el panel operando de manera ideal, es decir con la temperatura e irradiancia a condiciones estándar de operación.

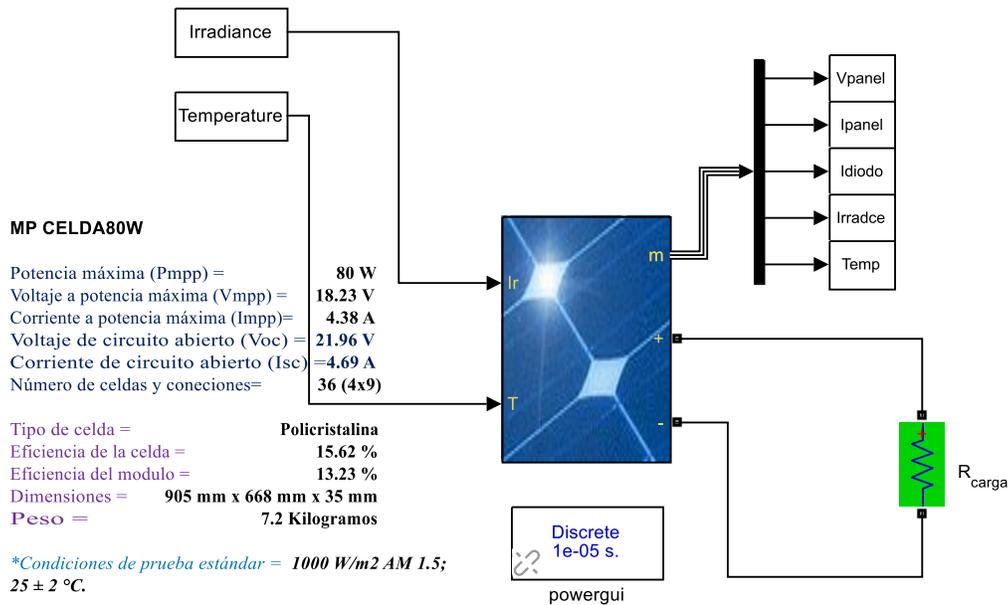


Figura 3.9: Panel PV con una resistencia fija en Simulink.

De acuerdo a la simulación de la Figura 3.9 se obtiene que para este valor de resistencia igual al valor de impedancia virtual del panel se obtiene la máxima potencia en condiciones estándar de operación. Si por el contrario cambiamos este valor de resistencia de carga, es decir, si aumentamos o disminuimos el valor de resistencia, entonces se extraerá un valor menor de potencia en ambos casos.

### 3.3.2. Panel PV conectado a una resistencia de carga variable

Otra forma de obtener el valor de la resistencia de carga óptimo que se debe conectar a un panel PV para extraer su máxima potencia, es conectando una resistencia variable en sus terminales y variarla hasta encontrar los puntos de máxima potencia (Voltaje y corriente del panel) con lo cual se puede obtener las curvas características del panel (V-I y P-V) las cuales son útiles para analizar el comportamiento del mismo. En la Figura 3.10 se observa el diagrama esquemático de una resistencia variable conectada a un panel solar, para este caso se elige un valor grande de resistencia de carga para lograr visualizar el voltaje de circuito abierto variando desde cero hasta 1000  $\Omega$ .

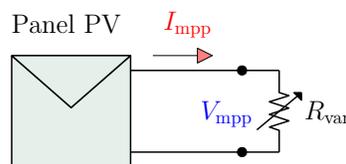
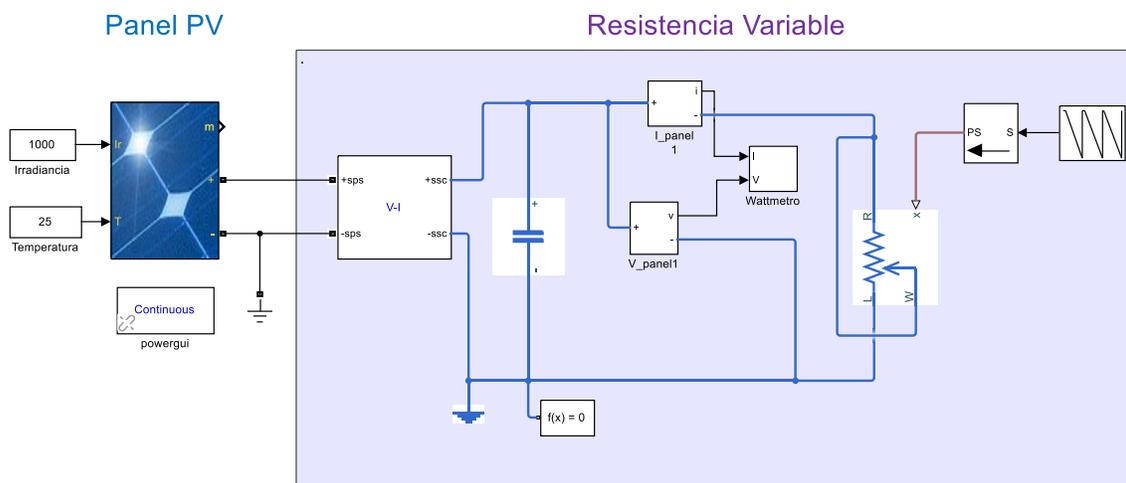


Figura 3.10: Panel PV con una resistencia variable.

El diagrama de bloques en Simulink del panel conectado a una resistencia variable se muestra en la Figura 3.11, en esta simulación se incluyen algunos elementos de la paquetería *Simscape/Electronics/Passive Devices* (diferenciados con líneas azules en el diagrama) y de la paquetería utilizada anteriormente (*Power Systems*), nótese que se emplea una interfaz para conectar los elementos de ambas librerías.

Al variar la impedancia (resistencia) conectada al panel se obtienen diferentes puntos de operación que forman las curvas características del panel y proporcionan información de este. Por ejemplo, en la Figura 3.12 se observa la curva Voltaje-Corriente (roja) y Potencia-Voltaje (azul), la potencia máxima o punto de máxima potencia es de 80 W, a partir de este punto es posible obtener los parámetros de voltaje y corriente para los cuales se extrae la máxima potencia del panel PV haciendo proyecciones sobre los ejes, además los extremos de las curvas proporcionan información del voltaje de circuito abierto y la corriente de cortocircuito.



**Figura 3.11:** Panel PV con una resistencia variable en Simulink.

Para poder obtener la curva de la Figura 3.12 es necesario utilizar un valor de resistencia de carga que varíe desde cero a un valor suficientemente grande a fin de obtener la corriente de cortocircuito y el voltaje de circuito abierto respectivamente. La potencia máxima se extraerá cuando se tenga un valor de resistencia igual que la impedancia del panel de acuerdo con el teorema de máxima transferencia de potencia. Las curvas de la Figura 3.12 se obtienen considerando que el panel opera en condiciones ideales (una irradiancia y temperatura constantes) para propósitos de estudio, sin embargo se sabe que en aplicaciones prácticas las condiciones ambientales cambian constantemente y con ello la máxima potencia que se extrae del panel.

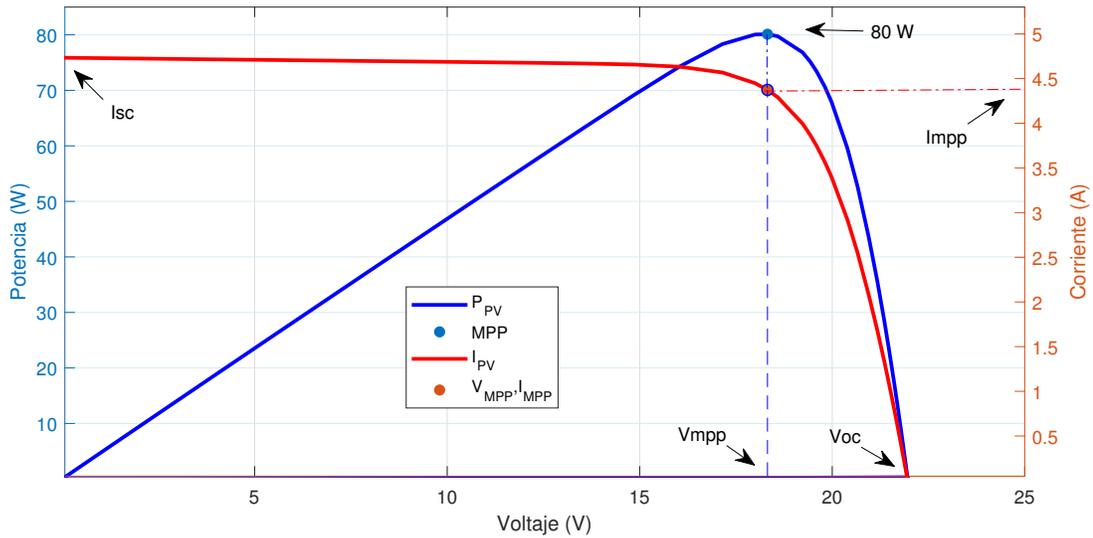


Figura 3.12: Curvas características del panel PV.

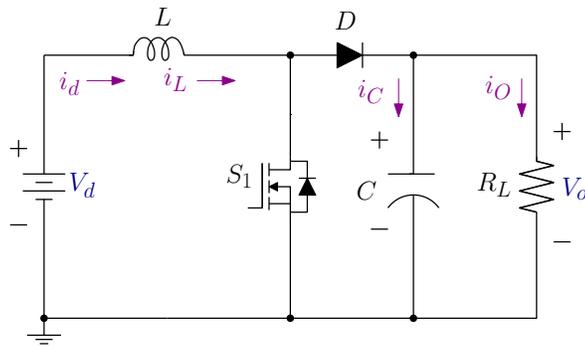
## 3.4. DISEÑO DEL CONVERTIDOR CD-CD

### 3.4.1. Convertidor Boost

Los convertidores estáticos de potencia CD-CD son dispositivos electrónicos utilizados para reducir, mantener o elevar un voltaje a su salida a partir de un voltaje de corriente directa a su entrada [12]. En la literatura se encuentran una gran cantidad de topologías siendo las más comunes el convertidor Reductor (Buck), el Elevador (Boost) y el Reductor-Elevador (Buck-Boost), cada una con ganancias de voltaje diferentes. En este proyecto se busca tener un voltaje estable y mayor que el proporcionado por el panel PV, para lo cual el convertidor Boost o elevador cumple con estas dos funciones. En la Figura 3.13 se muestra el diagrama esquemático de esta topología de forma ideal (sin resistencias parásitas de los elementos).

La relación entre el voltaje de entrada y el voltaje de salida del convertidor Boost ideal de la Figura 3.13 operando en modo de conducción continua es:

$$\frac{V_o}{V_d} = \frac{1}{1-D} \quad (3.2)$$



**Figura 3.13:** Diagrama esquemático del convertidor Boost.

De la ecuación (3.2) el término  $D$  se le conoce como *Ciclo de trabajo* y toma valores entre 0 y 1. El ciclo de trabajo es la señal de control para el convertidor, esta señal es una onda cuadrada con una frecuencia alta (arriba de los 20 kHz para casos prácticos) que conmuta el interruptor  $S_1$  a gran velocidad.

El convertidor Boost de la Figura 3.13 tiene una impedancia de entrada  $Z_{in}$  que se define como el cociente del voltaje y corriente promedio de entrada:

$$Z_{in} = \frac{V_d}{I_d} \quad (3.3)$$

Esta impedancia de entrada depende de la carga conectada a su salida ( $R_L$ ) y el ciclo de trabajo aplicado ( $D$ ), [13]. A continuación se deduce  $Z_{in}$  a partir el circuito de la Figura 3.13.

Considerando que el convertidor opera de forma ideal, se tiene que no existen pérdidas en la conversión de energía por lo que:

$$P_d = P_o ; V_d I_d = V_o I_o \quad (3.4)$$

$$\frac{I_d}{I_o} = \frac{1}{1-D} \quad (3.5)$$

$$I_d = \frac{I_o}{1-D} \quad (3.6)$$

$$I_o = \frac{V_o}{R_L} \quad (3.7)$$

$$I_d = \frac{V_d}{R_L(1-D)^2} \quad (3.8)$$

$$Z_{in} = \frac{V_d}{I_d} = \frac{V_d}{\frac{V_d}{R_L(1-D)^2}} = R_L(1-D)^2 \quad (3.9)$$

### 3.4.2. Panel PV con Convertidor Boost

El diseño de un convertidor de potencia involucra varios criterios a tomar en cuenta, los valores de los elementos reactivos (inductor, capacitor, resistencia de carga) a seleccionar resulta compleja debido a que la fuente de voltaje a la entrada de este (panel PV) presenta un comportamiento variable y no lineal por naturaleza. Sin embargo se debe establecer los siguientes criterios en el diseño del convertidor elevador para este proyecto, asegurando su correcto funcionamiento al ser acoplado a paneles solares:

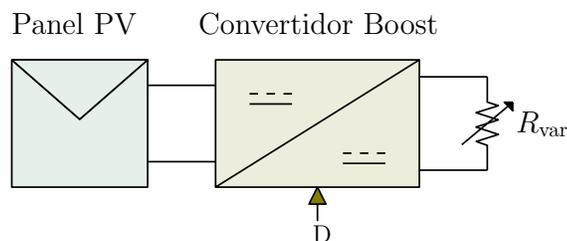
1. El convertidor operará de forma ideal es decir, no se consideran las resistencias parásitas del inductor  $L$  y el interruptor  $S_1$ .
2. El convertidor debe operar en el modo de conducción continua, lo que involucra que el valor de la corriente a través del inductor  $L$  sea mayor a cero.
3. La frecuencia de conmutación se selecciona con un valor mayor a los 20 kHz para disminuir el tamaño de los elementos reactivos.
4. El valor del capacitor  $C$  seleccionado debe ser lo suficientemente grande para disminuir el rizo de voltaje a la salida del convertidor y que el voltaje sea constante.

En la Tabla 3.3 se muestran los parámetros del convertidor Boost utilizado en este proyecto en simulación de acuerdo a los criterios de diseño enlistados anteriormente.

**Tabla 3.3:** Parámetros del convertidor Boost.

Parámetro	Símbolo	Valor
Inductor	$L$	288 $\mu\text{H}$
Capacitor	$C$	220 $\mu\text{F}$
Frecuencia de conmutación	$F_{\text{sw}}$	50 kHz

En la Figura 3.14 se observa el diagrama esquemático de un convertidor elevador el cual es alimentado desde un panel solar, ambos elementos operando de forma ideal. La función del convertidor conectado a la salida del panel, es que este opere como un acoplador de impedancia, es decir que exista una impedancia equivalente entre la resistencia de carga y el propio convertidor (3.8) y se vea reflejado en la entrada del panel.

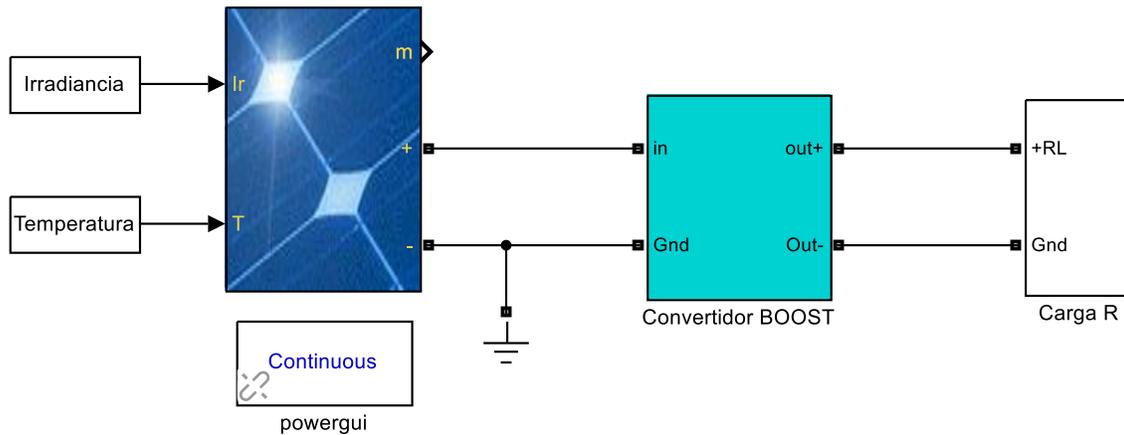


**Figura 3.14:** Convertidor Boost conectado a un panel PV.

Con esta configuración Panel-Convertidor se logra tener una entrada de control (ciclo de trabajo) para obtener un valor de impedancia (igual a la del panel) en función de la resistencia de carga conectada al convertidor, y con ello extraer la máxima potencia. Esto será de gran utilidad posteriormente para obtener el voltaje de CD desde la configuración Panel-Convertidor que se inyectará al inversor trifásico.

Una forma de comprobar (3.9) es realizando la configuración Panel-Convertidor de la Figura 3.14, estableciendo un ciclo de trabajo constante, y una resistencia de carga variable con el fin de determinar el valor de resistencia de carga con la cual se extrae la máxima potencia del panel PV.

En la Figura 3.15 se observa el diagrama de bloques de simulación de esta topología, utilizando un ciclo de trabajo de 0.6 y una variación de la resistencia de carga de 0 a 100  $\Omega$ , los valores de los elementos del convertidor y panel son los mismos utilizados anteriormente.



**Figura 3.15:** Convertidor Boost conectado a un Panel PV en Simulink.

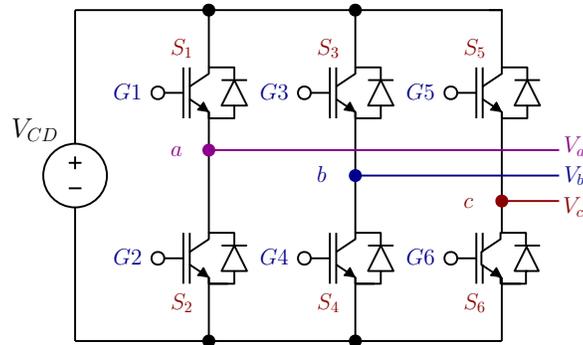
Despejando  $R_L$  de (3.9) y sustituyendo el valor de  $Z_{in}$  de (3.1) se puede calcular de el valor de la resistencia de carga ideal para el cual se extrae la máxima potencia del panel de la Figura 3.15:

$$R_L = \frac{Z_{in}}{(1-D)^2} \quad (3.10)$$

### 3.5. INVERSOR DE VOLTAJE TRIFÁSICO

Un inversor es un dispositivo que convierte un voltaje de entrada de corriente directa a un voltaje de salida de corriente alterna, con magnitud y frecuencia deseadas [14]. En aplicaciones industriales donde se demanda alta potencia, generalmente se utilizan inversores de voltaje trifásicos o también conocidos como inversores fuente de voltaje (VSI). En la Figura 3.16 se muestra un inversor trifásico ideal conformado por seis transistores IGBT como dispositivos de

conmutación.



**Figura 3.16:** Inversor trifásico ideal con semiconductores.

Entre las técnicas de control más utilizadas en inversores trifásicos está la técnica SPWM (Sinusoidal Pulse Width Modulation) debido a su simplicidad de implementación y su robustez. Esta técnica es caracterizada por una amplitud constante en los pulsos con diferentes ciclos de trabajo para cada periodo. El ancho de estos pulsos es modulado para obtener un voltaje de salida controlado en el inversor y así reducir su contenido armónico [15].

La técnica SPWM consta de tres ondas senoidales y una sola onda triangular para generar la señal PWM. Las ondas senoidales son llamadas señales de referencia y tienen un ángulo de fase de  $120^\circ$  entre ellas. La frecuencia de estas ondas senoidales se establece de acuerdo a la frecuencia de salida requerida en el inversor, que generalmente es de 60 Hz, mientras que la onda triangular o portadora usualmente se le asigna un valor alto de frecuencia (kHz). La señal de conmutación es generada comparando las ondas senoidales con la onda triangular. Al comparar estas dos señales se obtiene un pulso en alto cuando la onda de voltaje es mayor que la onda triangular y en caso contrario se genera un pulso en bajo o cero. En la Figura 3.17 se observa la técnica de generación SPWM convencional, estas seis señales generadas van directamente a las compuertas de los interruptores que conforman el inversor ( $S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6$ ). Nótese que solo es necesario generar las señales  $S_1, S_3$  y  $S_5$  ya que obteniendo estas se obtienen las señales  $S_2, S_4$  y  $S_6$  negando las primeras respectivamente. Esto debido a que un par de interruptores de una rama del inversor no pueden conducir al mismo tiempo. Existe una relación entre la

amplitud pico del voltaje de la onda senoidal y el de la onda triangular que se denomina índice de modulación de amplitud ( $m_a$ ):

$$m_a = \frac{V_{\text{control}}}{V_{\text{portadora}}} \quad (3.11)$$

La amplitud del voltaje de salida es linealmente proporcional a  $m_a$  siempre y cuando este índice sea igual o menor a 1, si esta condición no se cumple y  $m_a$  toma un valor mayor a 1, se dice que el inversor opera en sobremodulación lo cual lleva a una operación de onda cuadrada y añade mas armónicas al sistema.

Por otra parte, también hay una relación entre la frecuencia de la señal portadora y la de referencia, el índice de modulación de frecuencia ( $m_f$ ):

$$m_f = \frac{f_{\text{portadora}}}{f_{\text{referencia}}} \quad (3.12)$$

Para fines de diseño del inversor es deseable usar una frecuencia de conmutación (de la señal triangular) lo mas alta posible a fin de filtrar mas fácilmente los voltajes armónicos, sin embargo esto trae consigo una desventaja; las perdidas por conmutación en los interruptores. Una gran ventaja de utilizar inversores trifásicos controlados por PWM es que si se modifica el índice de modulación de amplitud es posible obtener un voltaje variable de salida que dependerá del voltaje de entrada de CD y las señales de referencia (senoidales) del sistema de control ya que la señal portadora se mantiene constante en amplitud.

En la Figura 3.17 también se muestran los voltajes de línea a la salida de un inversor trifásico cuyo voltaje de entrada es  $V_{CD}$ , donde los pulsos en cada medio ciclo tienen una amplitud igual al voltaje de entrada positivo o negativo según sea el caso.

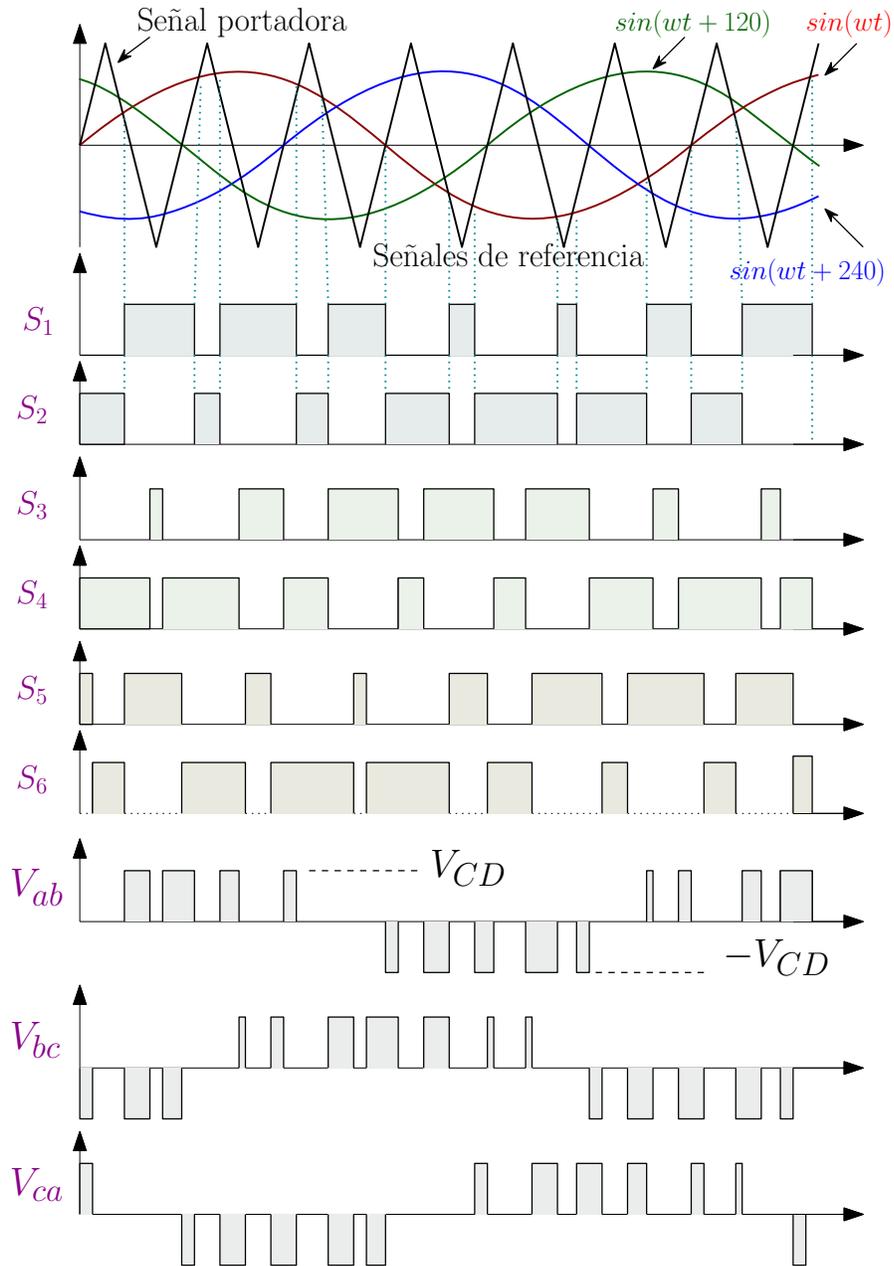


Figura 3.17: Técnica de generación SPWM para control de voltaje del inversor trifásico.

### 3.5.1. Inversor trifásico implementado en Simulink/MATLAB

Para la implementación del inversor trifásico en Simulink se utilizó seis transistores IGBT, estos dispositivos fueron seleccionados debido a que pueden ser controlados con señales de voltaje en su compuerta, tienen una alta velocidad de conmutación y son capaces de soportar alta potencia entre sus terminales emisor y colector. El elemento IGBT/Diode es ideal y se conectan de acuerdo a la Figura 3.16, en la Figura 3.18 se muestra el diagrama de bloques del inversor trifásico, las etiquetas  $S_1$  a  $S_6$  son las señales PWM para el control del mismo y a su salida se obtienen los voltajes  $V_a, V_b$  y  $V_c$ .

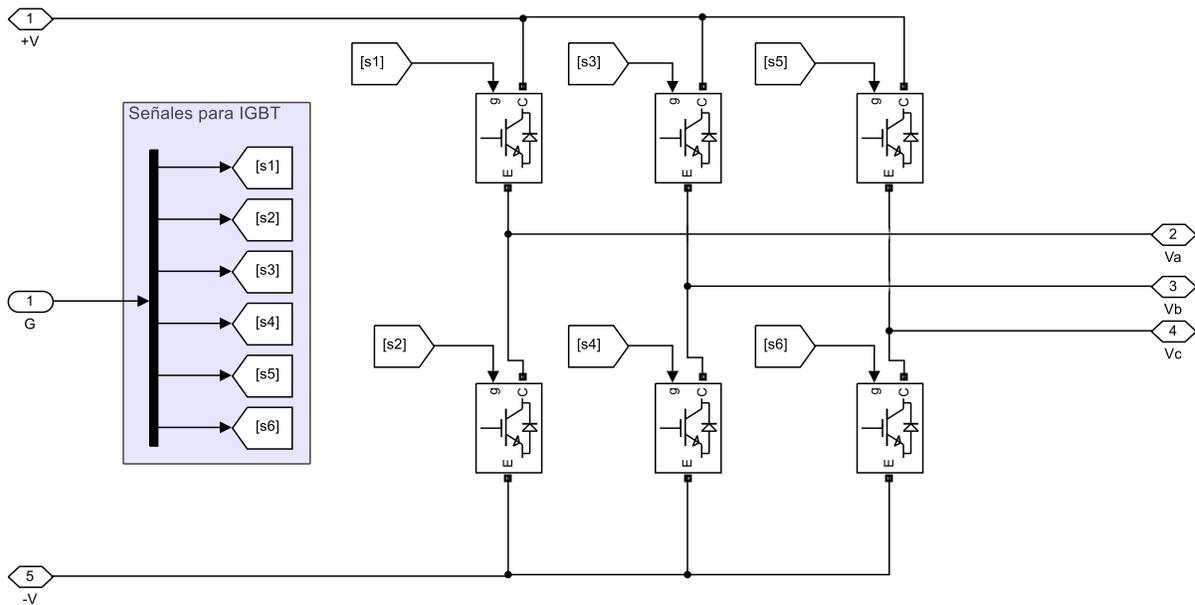


Figura 3.18: Inversor trifásico implementado en Simulink.

### 3.5.2. Sistema de control SPWM implementado en Simulink

Las señales que se requieren para el control de voltaje en el inversor de la Figura 3.18 son seis, que van directamente a la compuerta de los transistores IGBT, que de acuerdo a la Figura 3.17 se requiere comparar tres ondas senoidales desfasadas  $120^\circ$  y una señal triangular, la frecuencia de las ondas senoidales se establecen a 60 Hz para esta simulación y la frecuencia de

la señal triangular es de 360 Hz, y un índice de modulación de amplitud de 0.8 para que opere linealmente. En la Figura 3.19 se observa el sistema de control para el inversor trifásico de la Figura 3.18. Nótese que las señales  $S_2$ ,  $S_4$  y  $S_6$  se generan de forma fácil al invertir o negar la señal  $S_1$ ,  $S_3$  y  $S_5$  mediante un operador lógico (Not). Para este caso no se considera las pérdidas por conmutación de los interruptores debido a que se están utilizando modelos ideales.

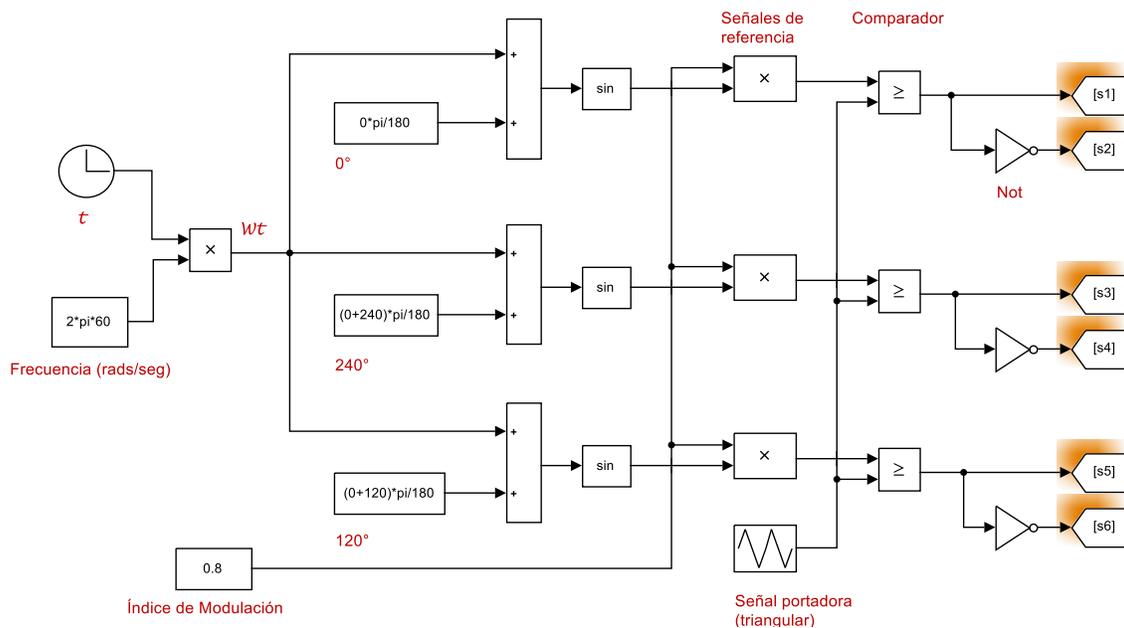


Figura 3.19: Sistema de control SPWM en Simulink.

Al aplicar un voltaje de entrada en el inversor ( $V_{CD}$ ) y controlarlo mediante SPWM los voltajes de línea de salida del inversor serán una secuencia de pulsos en cada semiciclo que dependerá directamente de la frecuencia de conmutación de la señal portadora, es decir, al tener valores altos de la frecuencia de la onda triangular se tendrán mayor cantidad de pulsos en cada semiperiodo, además el valor pico de estos pulsos de voltaje es igual al voltaje de entrada del inversor ( $V_{CD}$ ) tanto para el semiciclo positivo como en el negativo. Esto se puede observar en la Figura 3.20 donde se aplica un voltaje de 100 V de corriente directa a la entrada del inversor trifásico, donde la simulación se realizó para dos ciclos.

Lo mismo ocurre al medir los voltajes de línea  $V_{bc}$  y  $V_{ca}$  solo que se tienen secuencias de pulsos parecidos a los de la Figura 3.17. Para poder visualizar los pulsos generados se estableció una frecuencia de la onda triangular relativamente bajo de 360 Hz es decir un  $m_f$  igual a 6, aunque la elección de la frecuencia de conmutación es arbitraria, es deseable que sea alta (kHz) y un múltiplo impar de la frecuencia de las ondas de referencia para eliminar los armónicos pares del voltaje de salida.

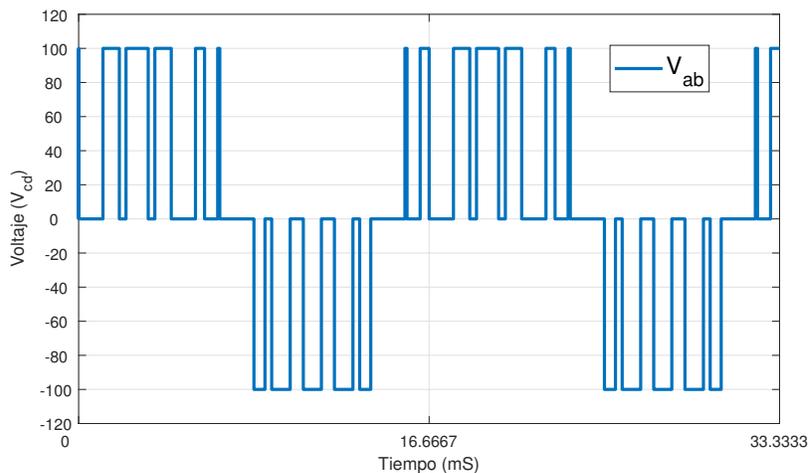


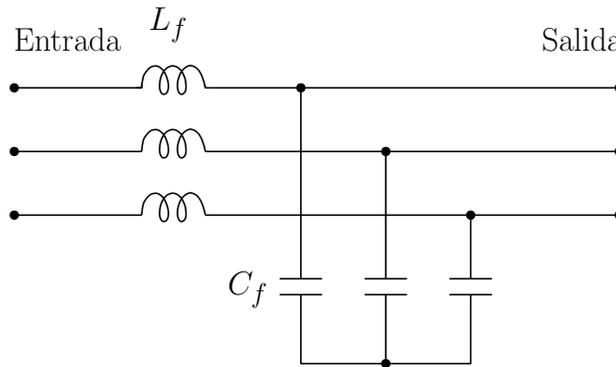
Figura 3.20: Voltaje de línea  $V_{ab}$  de salida.

### 3.6. DISEÑO DEL FILTRO LC

El voltaje de salida de un inversor tiene una gran cantidad de contenido armónico debido a alta velocidad de conmutación de los interruptores que lo conforman. Una forma de solucionar este problema es colocando un filtro pasivo a la salida del inversor. La función de un filtro pasivo es permitir el paso de frecuencias útiles en los sistemas y eliminar las frecuencias que no aportan un trabajo útil. Este tipo de filtros son formados por combinaciones serie o paralelo de elementos R, L o C [16].

Los filtros pasivos son generalmente clasificados como filtros pasa bajas, pasa altas y pasa bandas dependiendo del rango de frecuencias. Para el caso de un inversor trifásico las armónicas

generadas debido a la conmutación de los transistores son altas, por ello un filtro pasa bajas a su salida es requerido para eliminarlas. En este trabajo se utilizó un filtro de segundo orden LC compuesto por un elemento inductor en serie y un capacitor en paralelo con la carga (Figura 3.21).



**Figura 3.21:** Filtro LC.

El inductor tiene la propiedad de ofrecer una alta impedancia a corrientes de alta frecuencia, así las corrientes armónicas pueden ser suficientemente atenuadas por el inductor en serie. El capacitor en paralelo con la carga proporciona un camino de baja impedancia a la corriente de alta frecuencia y por lo tanto, desvía la cantidad significativa de corriente armónica de la corriente de salida del inversor. como resultado la corriente de carga tiene un contenido armónico muy inferior.

Debido a que el voltaje a la salida del filtro LC se inyectará directamente a los transformadores de inyección para la compensación de voltaje, colocar una resistencia grande a la salida del filtro resulta ventajoso para obtener un voltaje con menor rizo ante la acción transitoria. En la Tabla 3.4 se observan los valores de los elementos que conforman el filtro LCR implementado.

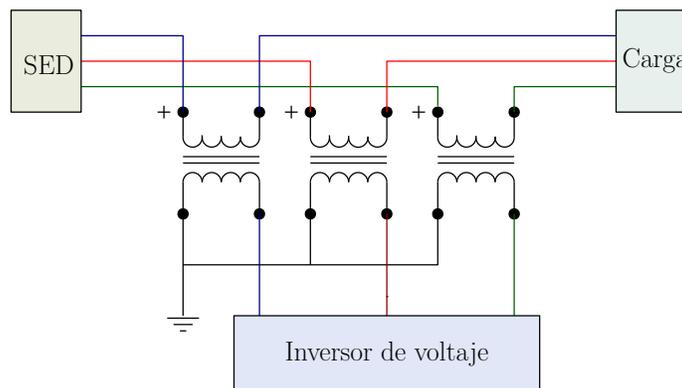
**Tabla 3.4:** Parámetros del Filtro LCR.

Parámetro	Símbolo	Valor
Inductor	$L_f$	3.3 mH
Capacitor	$C_f$	4.7 $\mu$ F
Resistencia	$R_f$	1000 $\Omega$

### 3.7. DIMENSIONAMIENTO DE LOS TRANSFORMADORES DE INYECCIÓN

En aplicaciones donde se utiliza un DVR como es el caso en este proyecto, los transformadores de inyección se insertan en serie entre la fuente de alimentación (red de distribución) a través del devanado secundario de alto voltaje y la carga, con el propósito de inyectar un voltaje controlable desde el inversor de voltaje y así mantener un voltaje estable en la carga al momento que se produce un Sag de voltaje o alguna interrupción. Además, el transformador de inyección sirve para aislar el sistema de compensación de energía de la red de distribución [17].

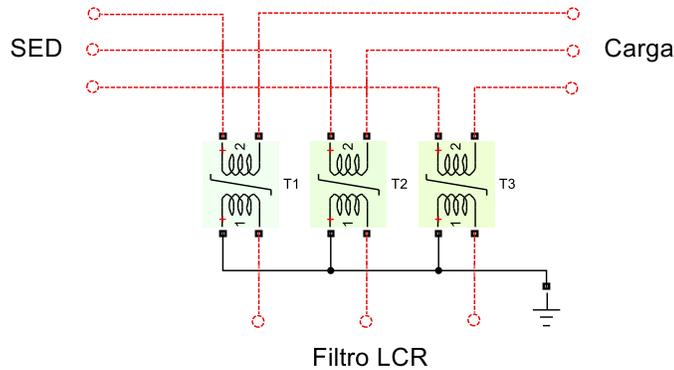
En la Figura 3.22 se muestra el diagrama de conexiones del transformador trifásico de inyección conformado por tres transformadores monofásicos, el devanado primario está conectado en estrella mientras que el devanado secundario está abierto en serie con la carga y el suministro.



**Figura 3.22:** Transformador de inyección trifásico (SIT).

Para simular un transformador de inyección trifásico se utiliza el bloque “Saturable transfor-

mer” que se puede encontrar en la siguiente ruta de componentes en simulink *Simscape/Power Systems/Specialized Technology/Fundamental Blocks/Elements*, este bloque representa un transformador monofásico por lo que se utilizó tres conectados de acuerdo a la Figura 3.22 para obtener un transformador trifásico de inyección. En la Figura 3.23 se observa el bloque utilizado para simulación.



**Figura 3.23:** Transformador trifásico de inyección en Simulink.

Como se puede observar en la Figura 3.23 cada transformador tiene dos devanados: el primario denotado con “1” y el secundario denotado con “2”. Para simplicidad en el dimensionamiento y simulación de este elemento se considero una relación de transformación 1:1 para aplicar directamente el voltaje de compensación requerido por la carga.

El bloque “Saturable transformer” tiene de forma predeterminada un devanado primario y dos secundarios, sin embargo puede configurarse para tener solo un devanado secundario. Además, este bloque puede ser configurado para obtener un dispositivo que se comporte lo más aproximado a un transformador de inyección, es decir, que tome en cuenta la relación de voltajes de los devanados, la potencia y frecuencia nominal de operación, la resistencia de los devanados ( $R_1$ ,  $R_2$ ) y la inductancias de fuga ( $L_1$ ,  $L_2$ ) así como las características de magnetización del núcleo, que se modela mediante una resistencia  $R_m$  que simula las pérdidas activas del núcleo y una inductancia saturable  $L_{sat}$ . Cabe mencionar que estos dos últimos parámetros no se modificaron en la simulación, es decir, se dejaron los valores predeterminados. En la Tabla 3.5 se especifican los valores de los parámetros utilizados para el transformador de inyección.

**Tabla 3.5:** *Parámetros del transformador de inyección.*

Parámetro	Símbolo	Valor
Potencia nominal	$P_n$	1000 VA
Voltaje primario	$V_1$	127 V
Resistencia del primario	$R_1$	0.1 $\Omega$
Inductancia del primario	$L_1$	2 mH
Voltaje secundario	$V_2$	127 V
Resistencia del secundario	$R_2$	0.1 $\Omega$
Inductancia del secundario	$L_2$	2 mH
Frecuencia de operación	$F_{SIT}$	60 Hz
Relación de transformación	$N_2/N_1$	1:1

### 3.8. CONCLUSIÓN

En este capítulo se presentó la descripción general del sistema DVR soportado con paneles solares, se describió cada una de las partes que conforman el DVR implementando cada dispositivo en Simulink para su posterior simulación e incorporación en el sistema en lazo cerrado. Cada parte que conforma el DVR se simuló en forma aislada para posteriormente unirlos al sistema de control y que en conjunto se obtenga el voltaje de compensación que se inyectará al sistema.

## Capítulo 4

### Sistema de control del DVR

En este capítulo se expone el sistema de control implementado para el DVR el cual se basa en el uso de las transformaciones de Clark y Park, herramientas matemáticas muy útiles para trabajar con señales senoidales trifásicas. Se describe a detalle la implementación de las transformaciones en Simulink/MATLAB mediante bloques para lograr la sincronización de las señales de sistema de distribución que alimenta a la carga y el voltaje de compensación, utilizando un PLL. Además se describirá como las señales generadas se utilizan para el control de voltaje que debe inyectar el inversor. También se aborda el sistema de control del convertidor para obtener el voltaje adecuado en el link de CD con el inversor desde el arreglo de paneles solares, este control será más directo modificando directamente el ciclo de trabajo de acuerdo al voltaje requerido por el inversor.

## 4.1. CONTROL DEL DVR

Uno de los requerimientos del DVR es que debe operar en tiempo real, es decir, el proceso de compensación debe ejecutarse inmediatamente después de ocurrir la falla sin retardo de tiempo, la velocidad de respuesta es una característica esencial en este dispositivo. Las variables que se requieren para el control son el voltaje medido directamente en la carga, y como salida se obtendrán los pulsos PWM que van al inversor. En este trabajo el algoritmo de control implementado es basado en la transformación DQ (dq0- direct-quadrature-zero), esta es una transformación matemática muy útil usada para simplificar el análisis de circuitos trifásicos [19]. La transformada  $dq0$  es llamada transformación de Park y ésta es complementaria con la transformada de Clark o  $\alpha\beta$ . A continuación se muestran las representaciones matemáticas de estas transformaciones así como sus respectivos diagramas de bloques para su implementación en Simulink de acuerdo con [18].

### 4.1.1. Transformaciones de Clark y Park

La transformación de Clark o transformación  $\alpha\beta$  ofrece la ventaja de reducir el orden del espacio en que se representan las señales trifásicas de 3 a 2. Para voltajes de un sistema trifásico balanceado, en forma matricial se tiene:

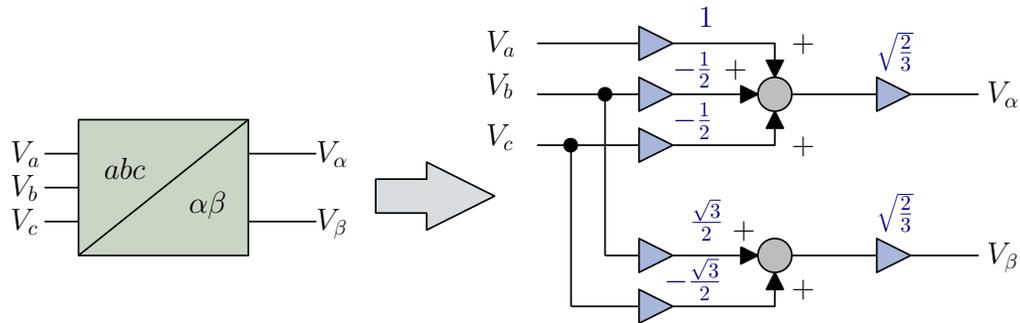
$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

La constante  $\sqrt{\frac{2}{3}}$  fuera de las matrices en la expresión (4.1) indica que la magnitud RMS línea-línea entre las fases  $a, b$  y  $c$  coinciden con la magnitud del vector integrado. Por otra parte las constantes que aparecen dentro de la matriz se obtienen de las funciones trigonométricas de los ángulos de las diferentes fases, por ejemplo:

$$\sin(60) = \frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$\cos(60) = \frac{1}{2}$$

También es posible representar en forma de bloques la transformada de Clark (4.1) como se muestra en la Figura 4.1. Cabe mencionar que los bloques se han tomado en cuenta con la operación directa de las matrices para fines de ejemplo, pero pueden realizarse simplificaciones en las operaciones de ser necesario para implementación práctica.



**Figura 4.1:** Bloque de transformación  $abc - \alpha\beta$  de acuerdo a (4.1).

Resolviendo el sistema de ecuaciones que se derivan de (4.1) se obtiene la transformada inversa de Clark, (4.2). El diagrama de bloques que representa esta transformación se muestra en la Figura 4.2.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Al aplicar un control retroalimentado es altamente deseable hacerlo con señales que no varíen con el tiempo, sin embargo, las componentes en  $\alpha\beta$  varían de forma sinusoidal. Para esto se utiliza la transformada de Park, que tiene como entrada el vector integrado en el marco de referencia  $\alpha\beta$ , y como salida un vector en el marco de referencia  $dq$ , cuyas componentes son constantes en el tiempo [4]. La transformada de Park se puede expresar como:

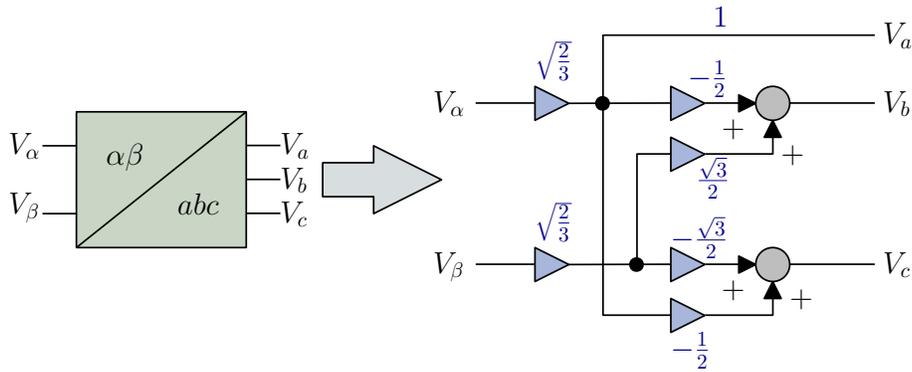


Figura 4.2: Bloque de transformación  $\alpha\beta - abc$  de acuerdo a (4.2).

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

El diagrama de bloques de la transformación de Park es el siguiente:

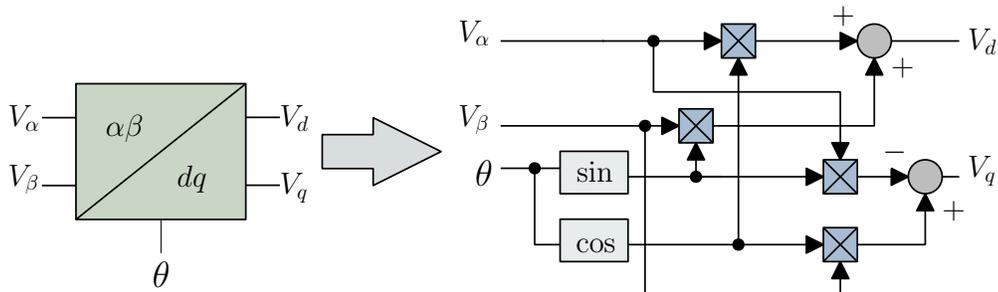
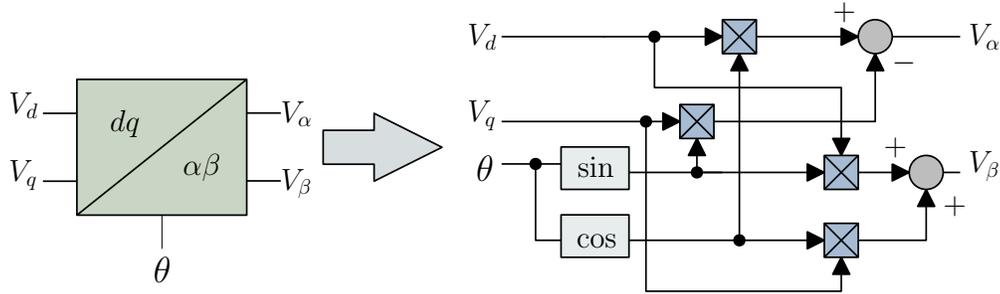


Figura 4.3: Bloque de transformación  $\alpha\beta - dq$  de acuerdo a (4.3).

Por lo general en aplicaciones prácticas no se utiliza (4.3) sino la transformada inversa de Park, con el fin de inyectar una señal en fase o cuadratura con la señal que se toma como referencia. La transformada inversa  $dq$  se expresa como:

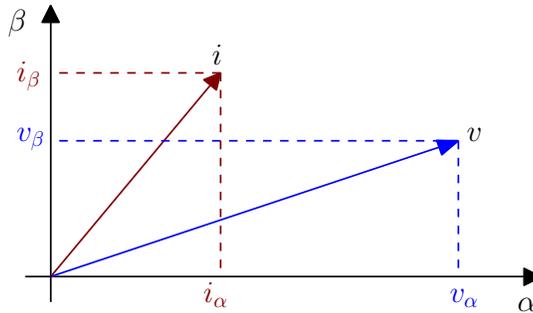
$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

El diagrama de bloques de la transformación inversa de Park se aprecia en la Figura 4.4.



**Figura 4.4:** Bloque de transformación  $dq - \alpha\beta$  de acuerdo a (4.4).

Con el uso de estas herramientas matemáticas en conjunto es posible medir algunas variables eléctricas del SED, por ejemplo, se puede determinar la potencia compleja midiendo el voltaje y corriente en un punto del sistema y transformando las variables al marco  $\alpha\beta$  tal como se muestra en el diagrama vectorial en la Figura 4.5.



**Figura 4.5:** Voltaje y corriente en un punto del SED.

De acuerdo al diagrama de la Figura 4.5 y la expresión que define la potencia compleja, se tiene que:

$$\vec{S} = \vec{V}\vec{I}^* = (v_\alpha + jv_\beta)(i_\alpha - ji_\beta) \quad (4.5)$$

$$\vec{S} = (v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta) + j(v_\beta i_\alpha - v_\alpha i_\beta) = P + jQ \quad (4.6)$$

De la expresión (4.6) se puede deducir que la parte real de potencia compleja corresponde a la potencia real o instantánea (P) mientras que la parte imaginaria corresponde a la potencia reactiva (Q), por lo tanto estas potencias quedan definidas como:

$$P = v_{\alpha}i_{\alpha} + v_{\beta}i_{\beta} \quad (4.7)$$

$$Q = v_{\beta}i_{\alpha} - v_{\alpha}i_{\beta} \quad (4.8)$$

El diagrama de bloques para obtener la potencia activa y reactiva midiendo el voltaje y corriente en un punto de la red haciendo uso de la transformada de Clark se muestra en la Figura 4.6, donde esta transformada solo se representa mediante un bloque simplificado el cual ha sido desarrollado anteriormente.

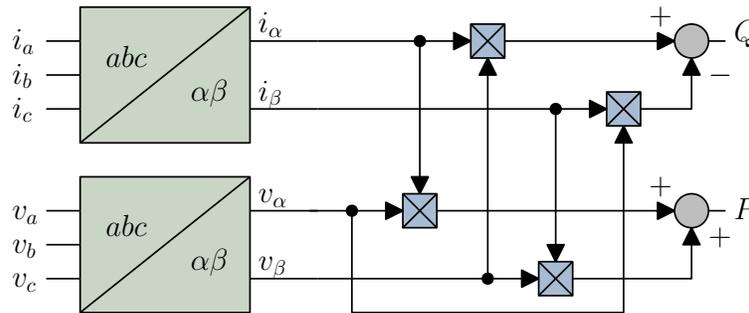
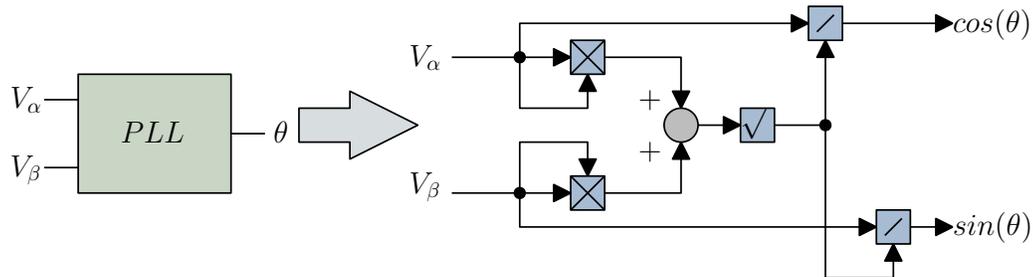


Figura 4.6: Cálculo de la potencia activa y reactiva.

#### 4.1.2. Sistema de sincronización

El DVR es un acondicionador de potencia el cual inyecta voltajes o corrientes en cuadratura o en fase con otros voltajes o corrientes de referencia, en este caso el SED que alimenta una carga. Con el uso de las transformadas de Clark o Park es posible generar una señal en fase o en

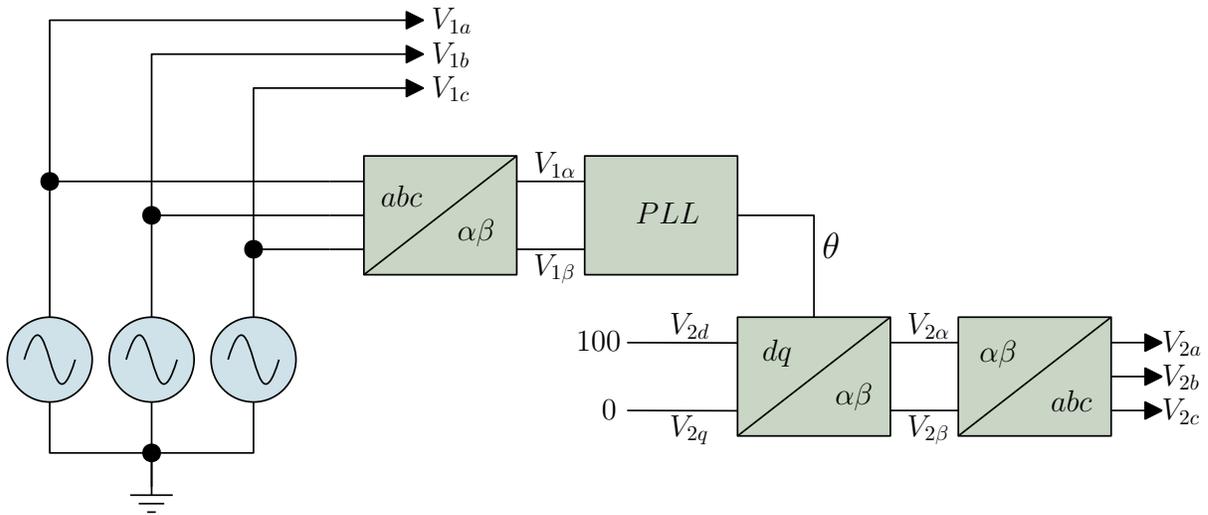
cuadratura con respecto a otra señal de referencia, y además también se tiene la posibilidad de controlar su amplitud con otra señal constante en el tiempo [18]. Pero para poder realizar esta acción es necesario primero medir el ángulo de fase del sistema que se toma como referencia ( $\theta$ ). Una forma comúnmente utilizada de medir este ángulo es mediante un PLL (Phase-Locked-Loop) o lazo de enganche por fase. La Figura 4.7 muestra las operaciones mediante bloques para realizar la función de un PLL.



**Figura 4.7:** Diagrama de bloques para la implementación del PLL.

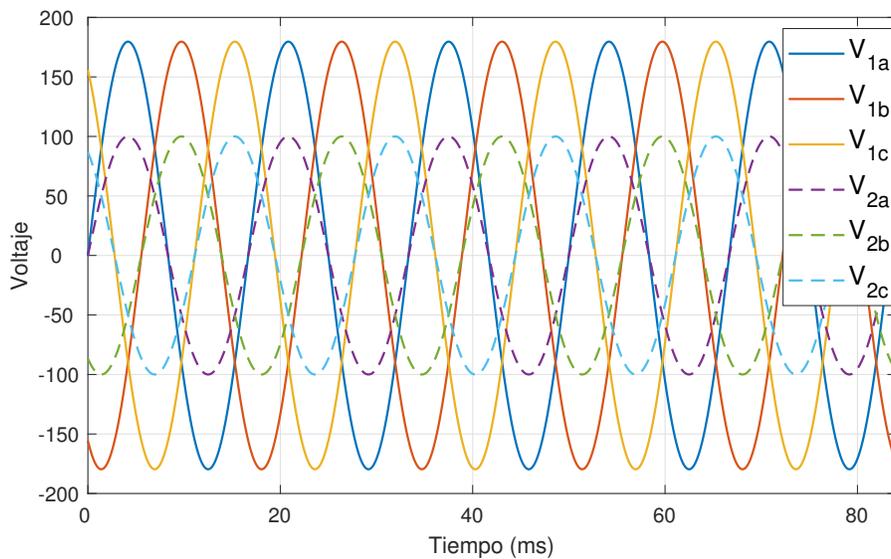
En la Figura 4.8 se muestra el diagrama de bloques para generar las señales sincronizadas en dq con un sistema trifásico. Primero se mide el voltaje en cada una de las fases del sistema trifásico ( $V_{1a}, V_{1b}, V_{1c}$ ) y estos valores sirven de entrada a un bloque de la transformada de Clark el cual tiene a su salida dos señales en el marco de referencia  $\alpha\beta$  ( $V_{1\alpha}, V_{1\beta}$ ) y el PLL consta de un bloque que tiene como entradas estas señales y a la salida se tiene el ángulo del vector integrado con respecto al eje  $\alpha$ , y este ángulo  $\theta$  se utiliza como entrada del bloque de la transformada inversa de Park.

El valor de 100 asignado a la componente del eje d ( $V_{2d}$ ) indica que se tendrá señales de voltaje en fase con el sistema trifásico con ese valor pico. Primero se utiliza el bloque de la transformada inversa de park a la cual se introducen los valores en los componentes  $d$  y  $q$ , además del ángulo  $\theta$  y a la salida se obtienen voltajes en el marco  $\alpha\beta$  ( $V_{2\alpha}, V_{2\beta}$ ) que sirven como entrada al bloque de la transformada inversa de Clark para finalmente obtener las señales de voltaje sincronizadas ( $V_{2a}, V_{2b}, V_{2c}$ ).



**Figura 4.8:** Generación de señales sincronizadas en dq con un sistema trifásico.

Se realiza la simulación para comprobar el sistema de sincronización de la Figura 4.8 en Simulink de Matlab con los valores del sistema de distribución de la Tabla 2.1, con un voltaje de línea a línea de 220V y aplicando un valor constante de 100 en el eje  $d$ , el resultado se muestra en la Figura 4.8 donde se observan los tres voltajes  $V_{1a}$ ,  $V_{1b}$ ,  $V_{1c}$  en fase con la referencia  $V_{2a}$ ,  $V_{2b}$ ,  $V_{2c}$ .



**Figura 4.9:** Señales de voltaje en fase con el sistema de distribución.

## 4.2. ESQUEMA DEL CONTROLADOR IMPLEMENTADO

El propósito del esquema de control es mantener la amplitud de voltaje constante en un punto de conexión de carga bajo perturbaciones del sistema. La Figura 4.10 muestra el esquema de control implementado y los parámetros que se miden con fines de control. Cuando el voltaje de la red está en su nivel normal, el DVR se controla para reducir al mínimo las pérdidas y solo inyectar el voltaje debido a la caída de tensión que provoca la impedancia de la línea. Cuando se detectan sags o swells de voltaje, el DVR debe reaccionar lo más rápido posible e inyectar un voltaje de CA a la red.

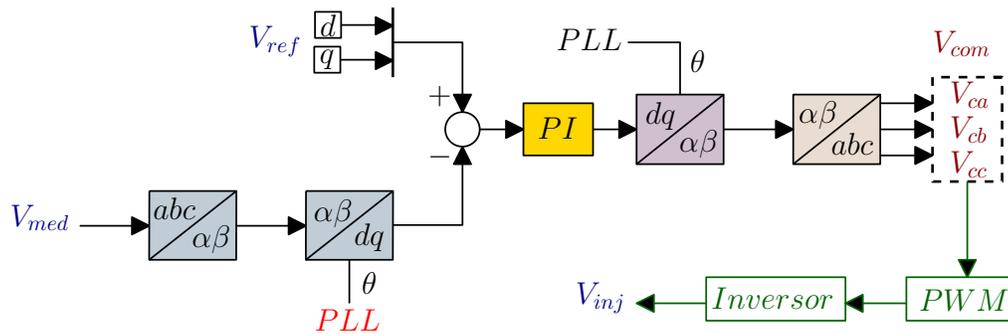


Figura 4.10: Esquema de control para el DVR.

El modo en que opera el circuito de control de la Figura 4.10 es el siguiente; primero se realiza la medición del voltaje en la carga trifásica  $V_{med}$ . Después estos voltajes son transformados a un marco de referencia  $dq$  empleando la transformada de Clark y Park respectivamente. Como se mencionó anteriormente, al utilizar las transformadas de Park se hace necesario la medición del ángulo  $\theta$  mediante un PLL. También se establecen los valores de referencia  $V_{ref}$  que es el valor deseado del voltaje en la carga que en este caso se denotan con valores constantes en  $dq$ . Posteriormente estos dos voltajes son comparados para obtener una diferencia o error, el error generado entra en un regulador PI, este controlador regula el voltaje de compensación  $V_{com}$  el cual es transformado de vuelta a un sistema  $abc$ , y las señales de voltaje resultantes son directamente enviadas al sistema de conmutación de los interruptores del inversor PWM y este genera el voltaje a ser inyectado en serie con la línea de distribución  $V_{inj}$  mediante los transformadores

de inyección.

### 4.3. CONTROL DEL CONVERTIDOR

El convertidor Boost utilizado en este proyecto tiene la función de proveer de energía mediante el enlace de CD del inversor trifásico, para lo cual debe suministrar el voltaje necesario de compensación en CD directamente de los paneles solares ( $V_{\text{panel}}$ ). Una forma de generar este voltaje es mediante un control directo del ciclo de trabajo del convertidor en función del voltaje de compensación requerido por el inversor. Para ello se hace uso de (3.2) de donde se despeja el ciclo de trabajo ( $D$ ):

$$D = 1 - \frac{V_d}{V_o} \quad (4.9)$$

El voltaje de entrada  $V_d$  de (4.9) corresponde al voltaje que se aplica al convertidor es decir el voltaje proveniente de los paneles  $V_{\text{panel}}$ , por lo que se requiere medir este voltaje directamente. Por otra parte, el término  $V_o$  en (4.9) es el voltaje de salida del convertidor o también es el voltaje de CD a la entrada del inversor. El voltaje requerido en el enlace de CD entre el convertidor-inversor al ocurrir un disturbio de corta duración es aproximadamente dos veces el valor pico del voltaje de compensación en CA. Es necesario aplicar un ciclo de trabajo al convertidor únicamente durante el tiempo en que se presente el disturbio, para reducir al mínimo las pérdidas, por lo que se debe medir en tiempo real el voltaje en la carga, para ello se utilizan las transformaciones de Clark y Park, y obtener el voltaje en ese punto en el marco de referencia estacionario o  $dq$  para ser comparado con un voltaje deseado. El diagrama de bloques para el control del convertidor se muestra en la Figura 4.11.

Tal como se muestra en la Figura 4.11, el valor pico corresponde al valor máximo por fase que se desea en la carga. También se utiliza un bloque para obtener el valor absoluto de la comparación entre el valor pico ideal y el valor en la componente  $d$  cuando ocurre el disturbio

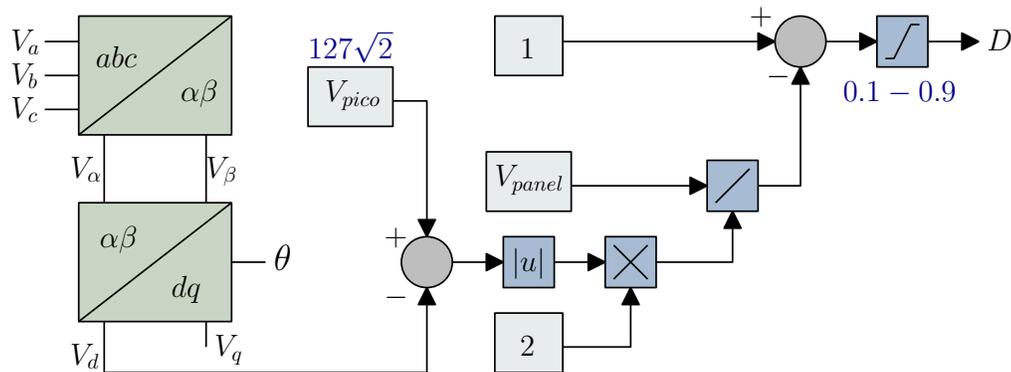


Figura 4.11: Esquema de control para el convertidor Boost.

ya que al ocurrir un swell de voltaje el valor a la salida del comparador será negativa. La variable que controla directamente el voltaje de salida del convertidor es el ciclo de trabajo, por lo cual se debe asegurar que opere dentro de los límites permitidos, es decir no tener un ciclo de trabajo menor a cero y no tan cercano a la unidad, por ello se utiliza un bloque de saturación a la salida del segundo comparador cuyo límite inferior es 0.1 y el límite superior es de 0.9.

## 4.4. CONCLUSIÓN

En este capítulo se expusieron las bases teóricas con las cuales se diseñó el circuito de control para el DVR; la generación del voltaje de compensación en fase con el voltaje de la red de distribución así como también se propuso un esquema de control sencillo para el convertidor elevador en el cual se modifica directamente el ciclo de trabajo de acuerdo al voltaje requerido por el inversor.

## Capítulo 5

### Simulación del DVR y resultados

En este capítulo se presenta la simulación en MATLAB/Simulink del Restaurador Dinámico de Voltaje soportado por paneles solares en lazo cerrado. En los capítulos anteriores se analizaron cada una de las partes que conforman este sistema pero de forma aislada (lazo abierto), sin embargo el objetivo de este proyecto es tener un sistema funcional que haga frente a las perturbaciones en el SED. Por lo cual es indispensable realizar simulaciones del sistema y analizar los resultados para asegurar la efectividad de la topología implementada. En este capítulo se exponen los resultados en simulación mediante gráficas las cuales nos proporcionan información importante acerca de cómo se comporta el sistema.

## 5.1. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

Con el fin de entender el desempeño del DVR ante sags y swells de voltaje, se simula este sistema mediante bloques en Simulink tal como se muestra en la Figura 5.1.

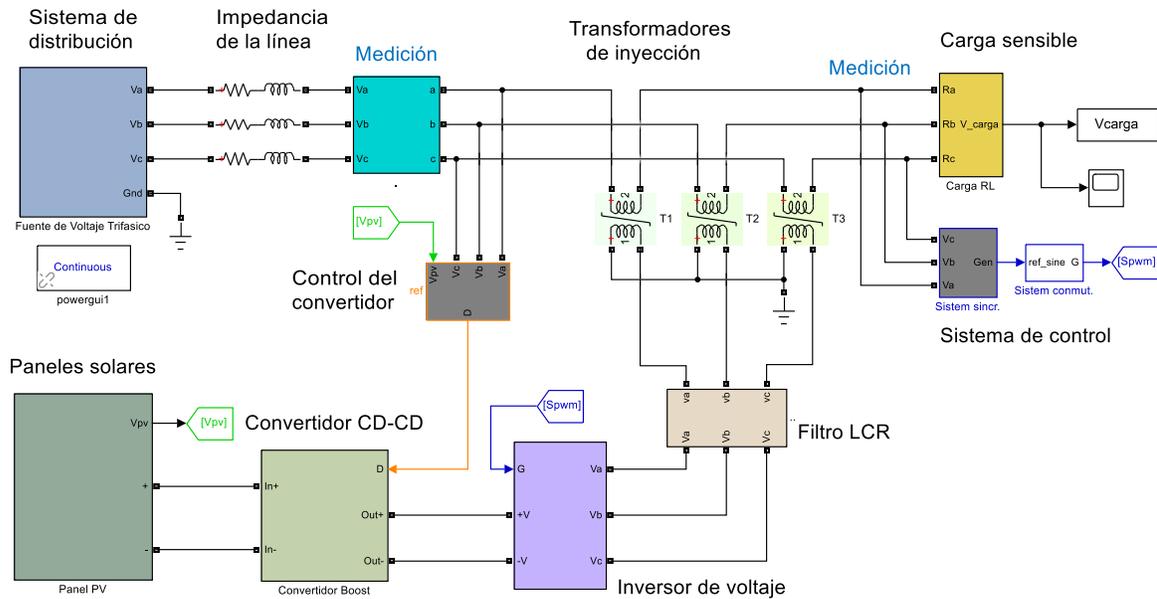


Figura 5.1: DVR implementado en MATLAB/Simulink.

Este DVR utiliza un transformador de inyección trifásico formado por tres transformadores monofásicos en conexión primario-estrella y secundario en serie con la línea de distribución, cuya relación de transformación es 1 : 1 es decir, el voltaje que se le aplica al primario es el mismo voltaje que se induce en el secundario. Además, un inversor de voltaje trifásico PWM al cual se le conecta un filtro LCR a su salida para eliminar las componentes de alta frecuencia en el voltaje de salida del inversor. Se utilizan bloques de medición en la carga sensible para medir el voltaje en ese punto y tomar los valores para el sistema de control. En la Tabla 5.1 se especifican los parámetros del sistema en general.

Cabe mencionar que las ganancias del controlador PI en este trabajo fueron elegidas de manera empírica reajustando los valores de estas ganancias para obtener el mejor resultado. Para

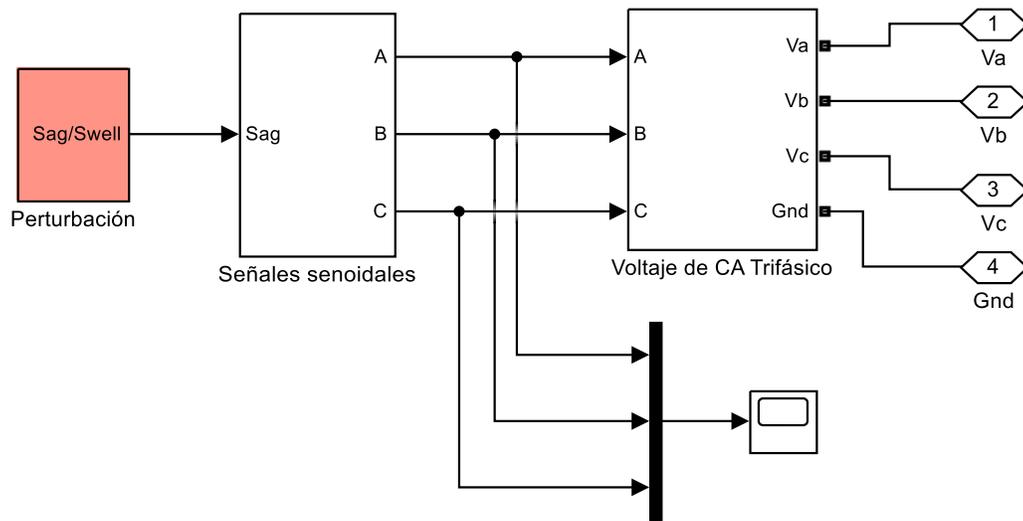
**Tabla 5.1:** Parámetros de simulación del DVR

Parámetro	Símbolo	Valor
Voltaje del sistema	$V_s$	220V
Frecuencia	$f_s$	60Hz
Potencia activa en la carga	$P_{carga}$	1 kW
Factor de potencia	$fdp$	0.8(-)
Resistencia de carga	$R_{carga}$	30.97 $\Omega$
Inductancia de carga	$L_{carga}$	61.6 mH
Resistencia del filtro	$R_{filtro}$	1000 $\Omega$
Inductancia del filtro	$L_{filtro}$	3.3 mH
Capacitancia del filtro	$C_{filtro}$	4.7 $\mu F$
Potencia del panel PV	$P_{pv}$	80 W
Número de paneles en serie	$N_s$	3
Numero de paneles en paralelo	$N_p$	5
Ganancia integral	$K_i$	5721
Ganancia proporcional	$K_p$	-0.004
Relación de transformación	$N_2/N_1$	1:1

el caso del dimensionamiento del arreglo fotovoltaico se tomó en cuenta la potencia activa que consume la carga, por lo que la mejor opción fue un arreglo de paneles en paralelo-serie, 5 paneles en paralelo para aumentar la corriente en el punto de máxima potencia y a la vez tres módulos en serie de estos 5 paneles para aumentar el voltaje, teniendo un total de 15 paneles de 80 W cada uno que conforman el arreglo PV, que como ya se mencionó anteriormente operan de forma ideal.

Para la simulación de las perturbaciones de corta duración (sag y swells de voltaje) se hizo un bloque para tal fin en el cual se toma en cuenta la magnitud en p.u del voltaje del sistema y la duración en ciclos de dicha falla, es decir, si se trata de una sag de voltaje se puede establecer la magnitud en p.u del voltaje que será menor a 1.0 y si se presenta un swell de voltaje su valor sera mayor a 1.0 p.u, pudiendo variar el tiempo que dura cualquiera de estas perturbaciones. En la Figura 5.2 se observa como el bloque de perturbación se conecta directamente a las señales sinusoidales que posteriormente se transforman a voltajes trifásicos.

A continuación se describen los principales bloques que se encuentran en Simulink que



**Figura 5.2:** Bloque de perturbación aplicado al SED.

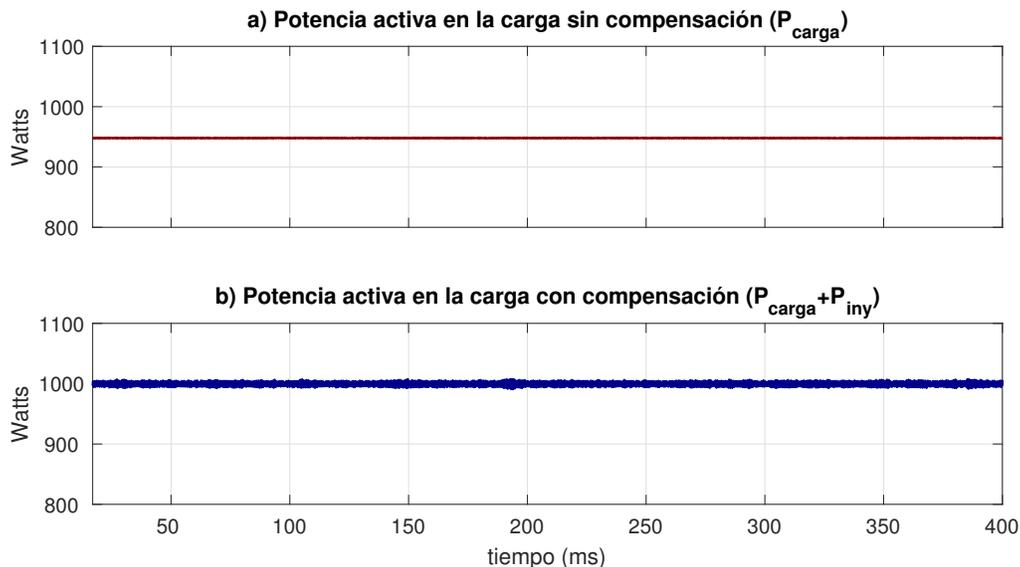
fueron utilizados para realizar la simulación del sistema:

- Controlled Voltage Source: Convierte una señal de entrada de Simulink en una fuente de voltaje equivalente de CD o CA. El voltaje generado es controlado por la señal de entrada del bloque.
- Scope: Visualiza las señales generadas durante la simulación.
- To Workspace: Con este bloque los datos generados en Simulink se escriben en el espacio de trabajo base de MATLAB para su posterior manipulación, como obtener gráficas o realizar operaciones.
- Series RLC Branch: Implementa una rama en serie de elementos RLC con la opción de elegir un solo elemento o una combinación de ellos.
- PWM Generator (DC-DC): Envía un pulso a un interruptor electrónico de un convertidor CD-CD donde el ciclo de trabajo (D) determina el porcentaje del periodo de pulso en que se encuentra activo.
- Saturable Transformer: Implementa un transformador de tres devanados con opción de establecer solo dos.

- PID controller: Este bloque implementa algoritmos de control PID de tiempo continuo y discreto.
- PV array: Permite el modelado de una variedad de módulos fotovoltaicos preestablecidos disponibles en NREL System Advisor Model (enero de 2014), así como módulos fotovoltaicos definidos por el usuario.

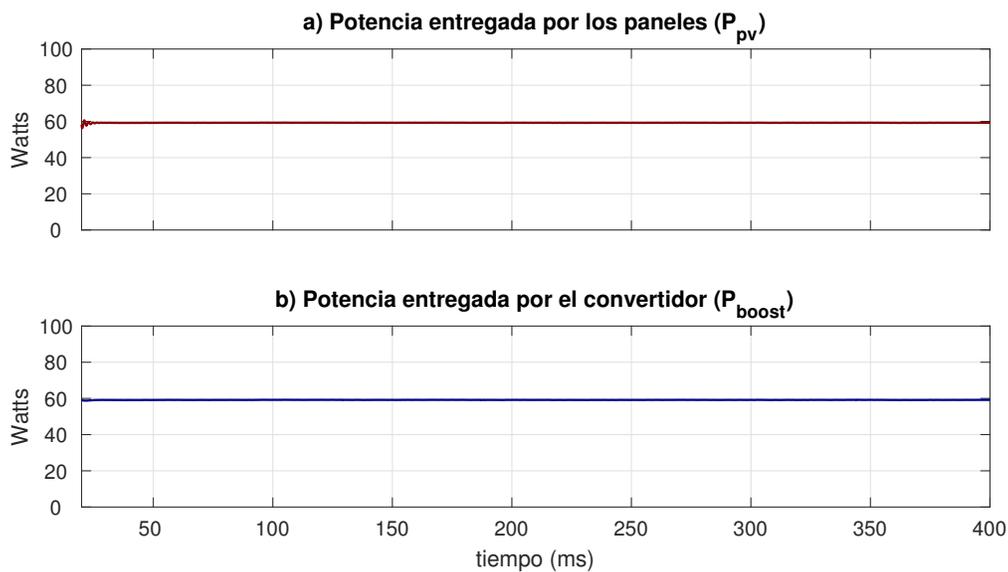
### 5.1.1. Resultados para un voltaje normal en la red

Inicialmente para esta primera simulación se asume que no existe perturbación alguna en el SED y por lo tanto se entrega el voltaje nominal a la carga sensible, sin embargo debido a la impedancia propia de la línea se tiene una caída de tensión a través de ella y es precisamente esta caída el voltaje que debe compensar el DVR. Para las gráficas que se verán de aquí en adelante se mostrarán los voltajes por fase (monofásicos) y el tiempo de simulación será de 24 ciclos o 400 milisegundos. En la Figura 5.3 se visualiza la potencia activa en la carga trifásica antes y después de la compensación.



**Figura 5.3:** Potencia activa en la carga antes y después de la compensación sin perturbación en el sistema.

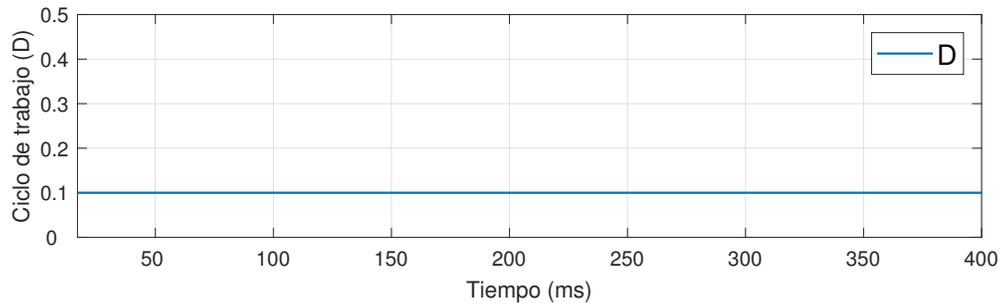
La potencia activa que se inyectó al sistema desde los paneles solares es de aproximadamente 50 W sin tomar en cuenta la potencia disipada en los elementos de conversión de energía. En la Figura 5.4 se muestra la potencia que entregan los paneles y el convertidor Boost para solo compensar la caída de voltaje en la línea. Estas dos potencias siempre tendrán un valor muy cercano entre ellas debido a que el convertidor se asume que opera de forma ideal, es decir solo modifica el voltaje de salida del panel a un valor mayor pero conservando la potencia que entrega éste. Para este caso el inversor de voltaje requiere inyectar un voltaje tan pequeño que el control del convertidor satura el ciclo de trabajo en 0.1 tal como se observa en la Figura 5.5.



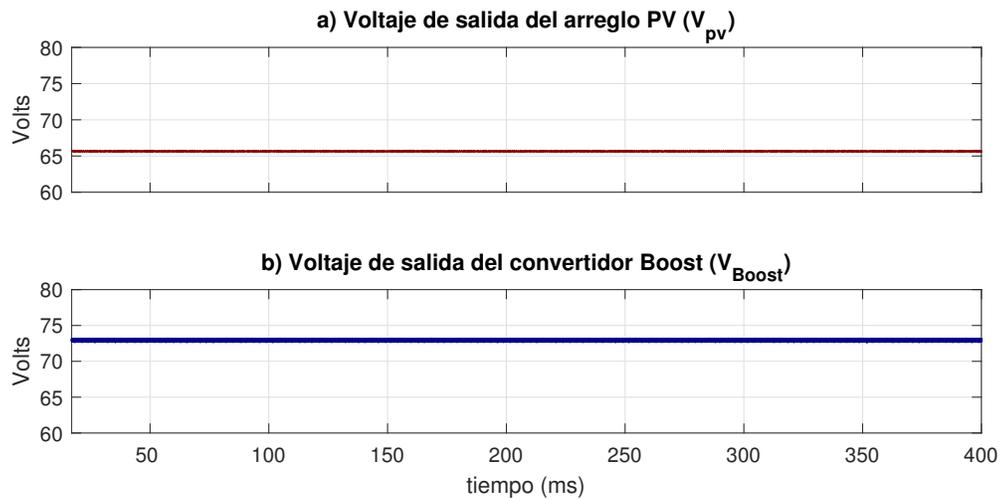
**Figura 5.4:** Potencia entregada por los paneles y el convertidor Boost sin perturbación en el sistema.

Al aplicar un ciclo de trabajo de 0.1 al convertidor, este tiene un voltaje a su salida en función de su ganancia y el voltaje de entrada, que como se muestra en la Figura 5.6 es el voltaje  $V_{pv}$  de aproximadamente 65 volts ya que se tiene tres módulos PV en serie con un voltaje en el punto de máxima potencia de 18.23 V, pudiendo ser este valor de voltaje diferente si no se opera en este punto, por lo tanto el convertidor tiene a su salida un voltaje aproximado de:

$$V_{Boost} = \frac{65}{1 - 0.1} = 72.22 \text{ V} \quad (5.1)$$

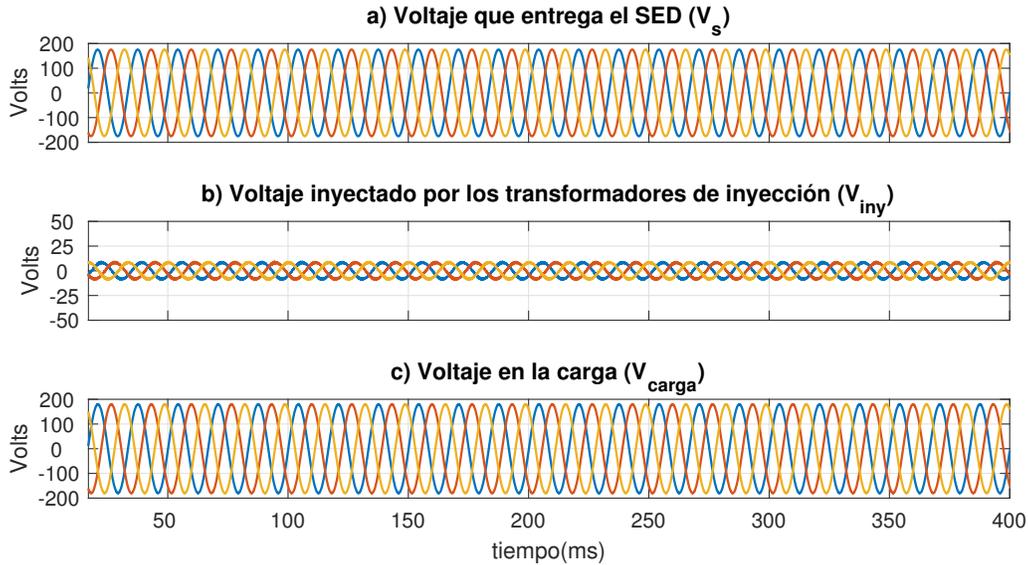


**Figura 5.5:** Ciclo de trabajo aplicado al convertidor sin perturbación en el sistema.



**Figura 5.6:** Voltaje del arreglo PV y el convertidor sin perturbación en el sistema.

El voltaje de la red ( $V_s$ ), el voltaje que inyectan los transformadores de inyección ( $V_{iny}$ ) y el voltaje que se tiene en la carga cuando el DVR realiza la acción de compensación se muestran en la Figura 5.7. Cabe mencionar que no se toma en cuenta el tiempo transitorio y las oscilaciones de las distintas variables en estas simulaciones ya que no es objetivo de este trabajo por ende se gráfica solo la parte estable.

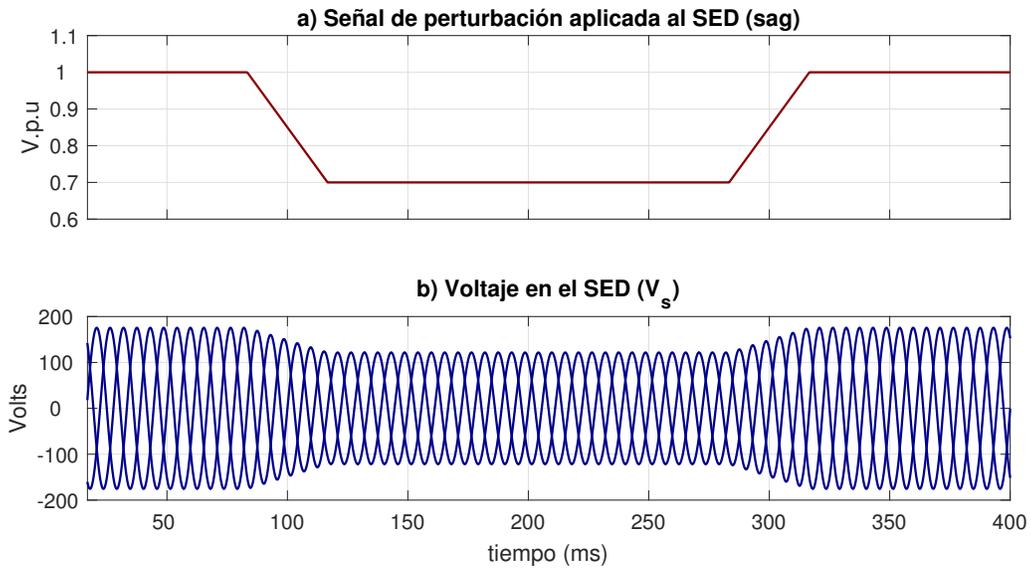


**Figura 5.7:** Voltajes sin perturbación en el sistema.

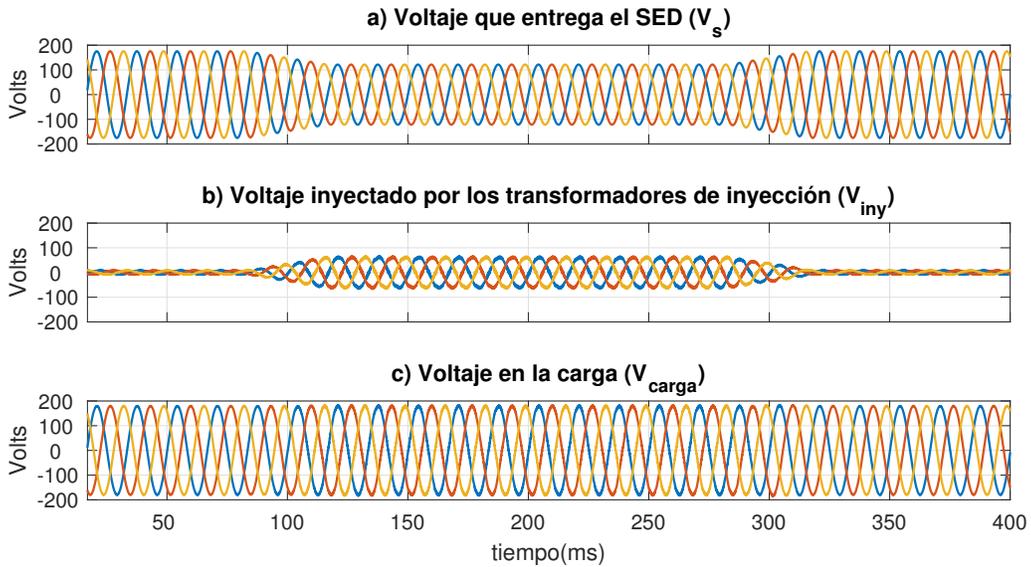
### 5.1.2. Resultados para un sag de voltaje en la red

En la Figura 5.8 se muestra la señal o perturbación aplicada a las señales senoidales para simular un sag de voltaje de 0.7 p.u en la red, es decir, una disminución del 30 % del voltaje rms del sistema. Este disturbio de corta duración empieza a los 84 milisegundos y termina a los 317 milisegundos, es decir se simula un sag con una duración de 233 milisegundos o lo que es igual a 14 ciclos, donde el sag no ocurre de manera abrupta en ese tiempo sino que se toma dos ciclos en llegar a 0.7 p.u y otros dos ciclos para recuperarse a la condición normal. En esta misma figura se tiene el voltaje trifásico en la red al aplicar el sag.

En la Figura 5.9 se observa las formas de onda del voltaje en la red, el voltaje inyectado y el voltaje en la carga al ocurrir un sag de voltaje simétrico y trifásico, se observa que el DVR es capaz de inyectar un voltaje en fase en las tres fases de la red durante el tiempo que dura el disturbio de corta duración, y es notado que para variaciones de voltaje en la red, el voltaje en la carga se mantiene constante e igual al voltaje nominal. Con lo cual se comprueba el correcto funcionamiento de la topología implementada.

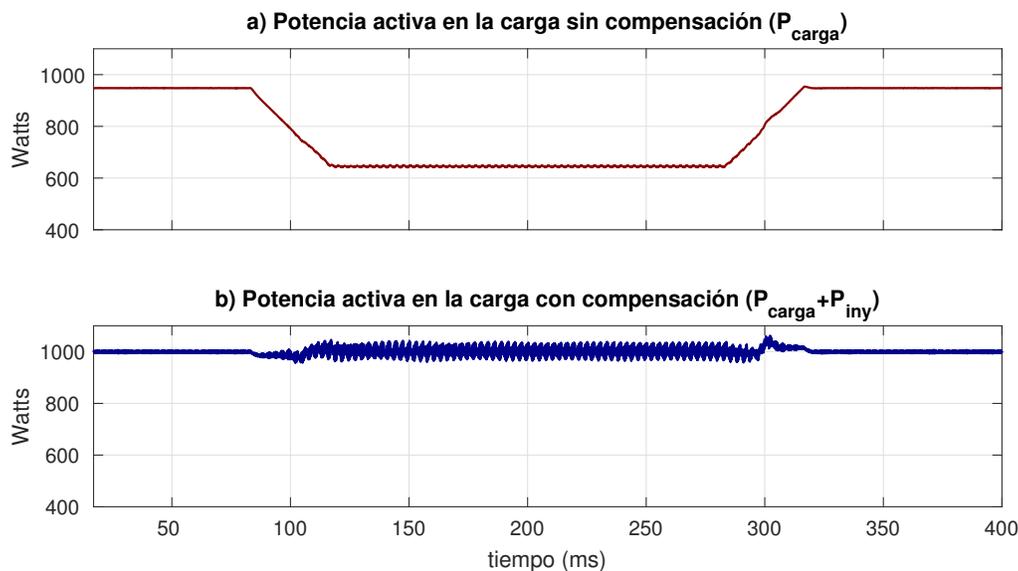


**Figura 5.8:** Simulación de un sag de voltaje de 0.7 p.u en el sistema.



**Figura 5.9:** Voltajes para un sag de 0.7 p.u en el sistema.

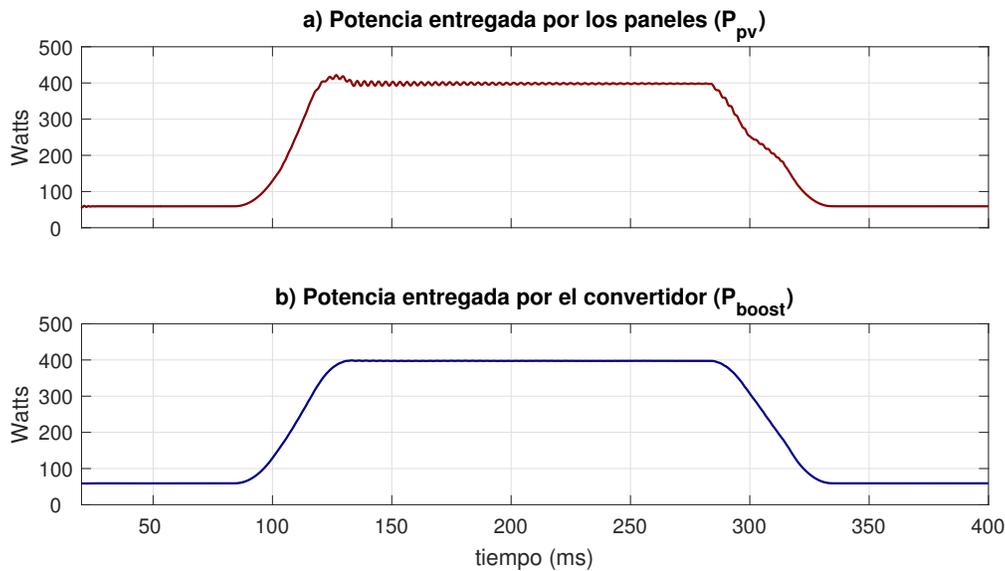
Ahora que se aplica un sag de voltaje a la red, trae como consecuencia que el voltaje entregado a la carga se reduzca hasta los 88.9 V rms por fase y entonces la potencia activa que consume la carga también disminuye tal como se muestra en la Figura 5.10. Este valor de potencia disminuye hasta los 650 W aproximadamente, y esta es la potencia que deben entregar los paneles solares para compensar el voltaje en la red. Cuando el DVR actúa y compensa el voltaje en la carga, entonces la potencia activa que consume la carga vuelve a ser la potencia nominal de 1 kW. Las oscilaciones de potencia que se observan es debido a que tanto el voltaje como la corriente que consume la carga tienen también oscilaciones al momento de la compensación sin embargo el valor promedio corresponde al valor nominal.



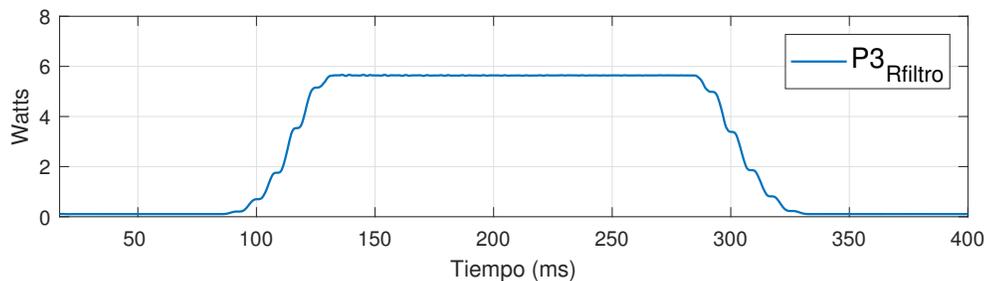
**Figura 5.10:** Potencia activa en la carga antes y después de la compensación para un sag de 0.7 p.u en el sistema.

Para poder dar soporte a los sags de voltaje profundos, el arreglo de paneles solares abastece de energía al DVR. En la Figura 5.11 se observa la potencia entregada por los paneles solares y el convertidor elevador, la potencia entregada por ambos dispositivos es de 400 W aproximadamente. Con lo que se puede inferir que entrega los 350 W de potencia activa requerida para la compensación y los otros 50 W son disipados en otros dispositivos como pérdidas. Por ejemplo en el filtro LCR la resistencia que forma parte de éste, consume una pequeña cantidad de poten-

cia que se considera pérdida ya que no se utiliza para inyectarla a la red tal como se muestra en la Figura 5.12 el valor de potencia total que consumen las resistencias del filtro apenas alcanza los 6 W.



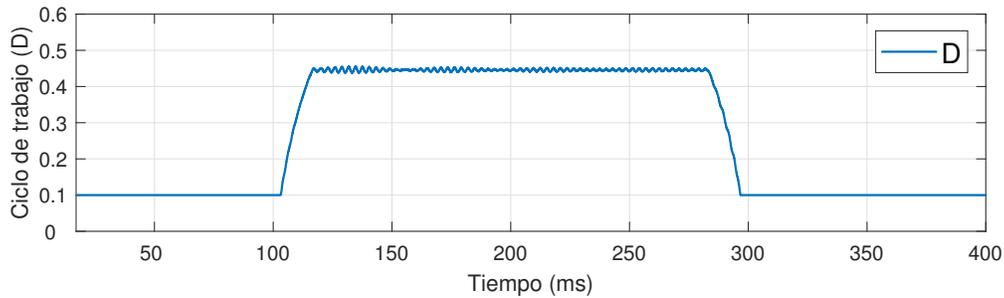
**Figura 5.11:** Potencia activa entregada por el arreglo PV para un sag de 0.7 p.u en el sistema.



**Figura 5.12:** Potencia que consume la parte resistiva del filtro LCR.

El ciclo de trabajo que genera el sistema de control del convertidor es de aproximadamente 0.45 durante el tiempo que ocurre la perturbación y se mantiene en 0.1 en condición normal con el fin de operar en modo de conducción continua.

El voltaje que proporciona el arreglo PV es de aproximadamente 64 V tal como se observa



**Figura 5.13:** Ciclo de trabajo aplicado al Convertidor Boost para un sag de 0.7 p.u.

en la Figura 5.14. Con este voltaje y con ciclo de trabajo de aproximadamente 0.45 aplicado al convertidor se tiene un voltaje a la salida de aproximadamente:

$$V_{\text{Boost}} = \frac{64}{1 - 0.45} = 116.36 \text{ V} \quad (5.2)$$

Es fácil comprobar que este valor de voltaje corresponde al voltaje medido a la salida del convertidor en la Figura 5.14, con lo cual se comprueba que el sistema de control del convertidor genera correctamente el ciclo de trabajo necesario en el momento de la falla y se satura con valores menores de 0.1.

Con la implementación del diagrama de bloques de la Figura 4.6 se puede calcular las potencias en la carga antes y después de la compensación, es decir la potencia activa, reactiva y la aparente. La Figura 5.15 muestra los resultados de el cálculo de las potencias, en la cual  $Q_1$ ,  $P_1$  y  $S_1$  corresponden a la potencia reactiva, activa y aparente que consume la carga antes de que se realiza la compensación de voltaje mientras que  $Q_2$ ,  $P_2$  y  $S_2$  son las potencias que consume la carga al realizarse la compensación.

### 5.1.3. Resultados para un swell de voltaje en la red

Ahora se simula un swell o elevación de voltaje de 1.3 p.u en la red es decir un aumento del 30 % del voltaje rms del sistema. Si se tiene 127 V por fase al aplicar esta perturbación entonces

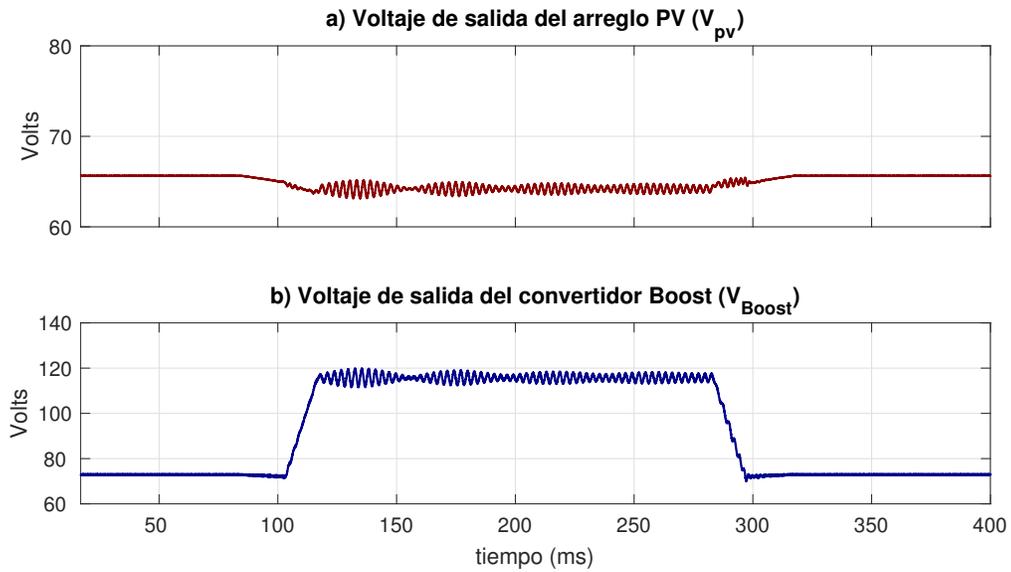


Figura 5.14: Voltaje del arreglo PV y del convertidor Boost para un sag de 0.7 p.u.

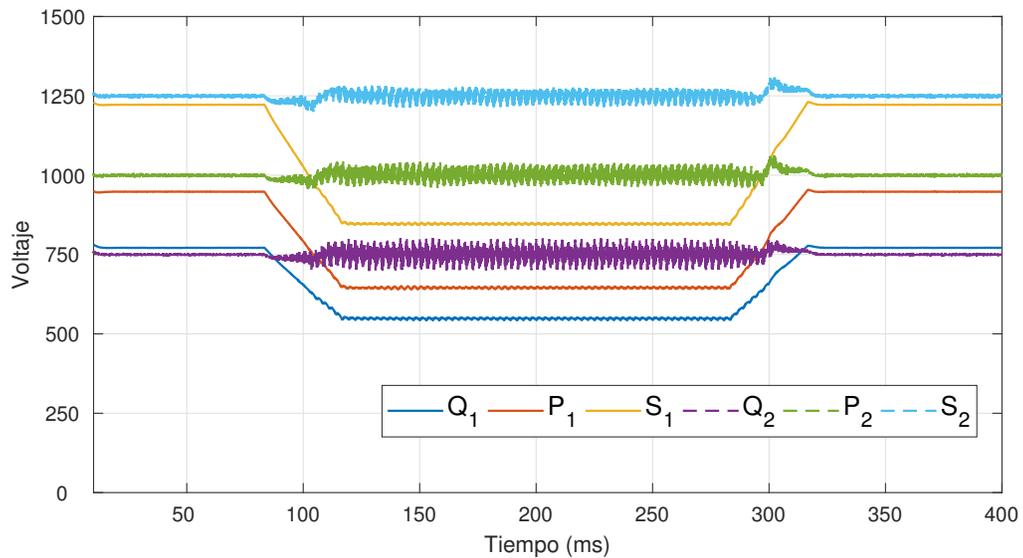
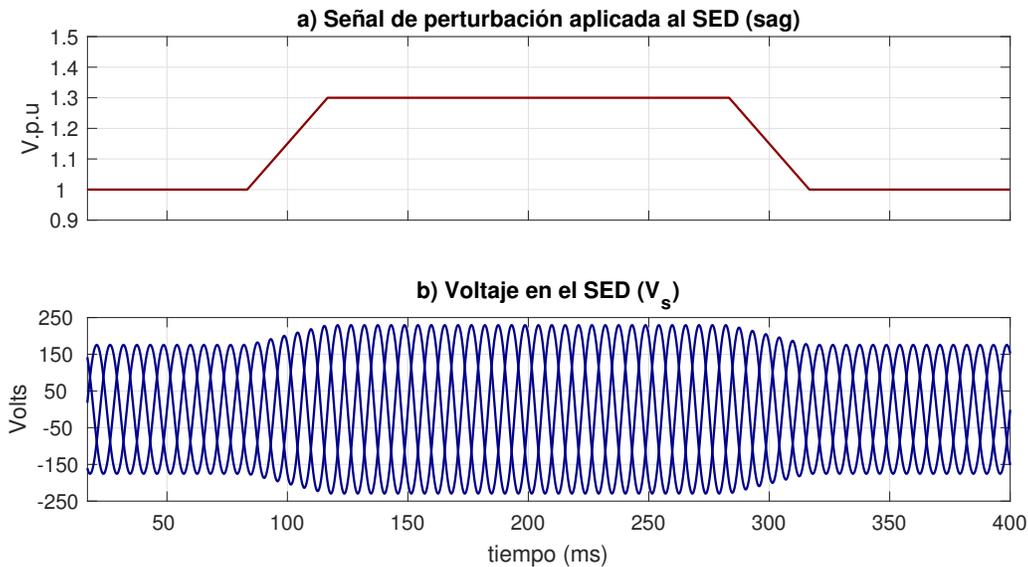


Figura 5.15: Potencias en la carga antes y después de la compensación para un sag de 0.7 p.u.

el voltaje será de 165.1 V. En la Figura 5.16 se visualiza la señal aplicada a las señales senoidales de voltaje para simular un swell y el voltaje en el SED bajo este disturbio de corta duración.

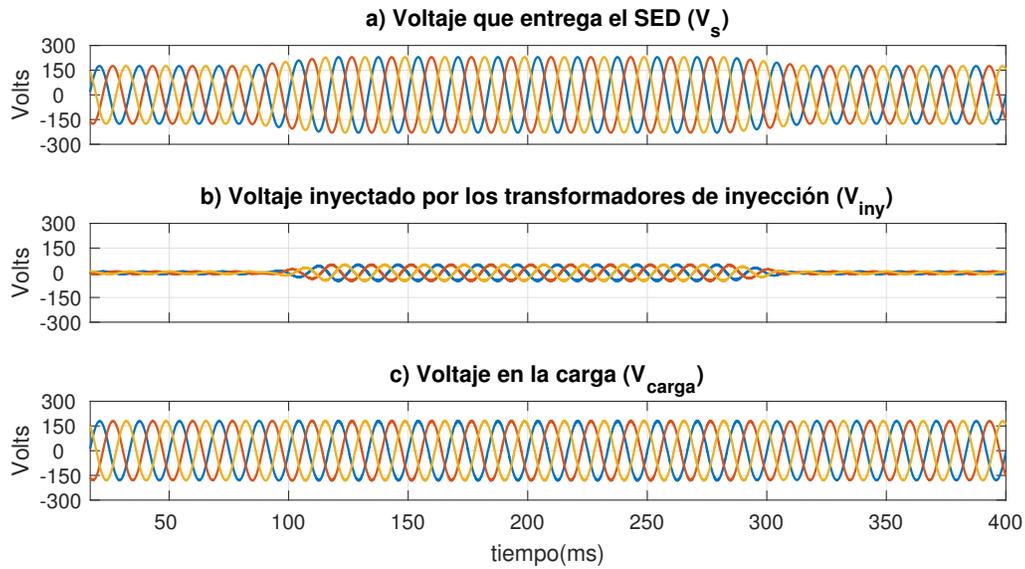


**Figura 5.16:** Simulación de un swell de voltaje de 1.3 p.u en el sistema.

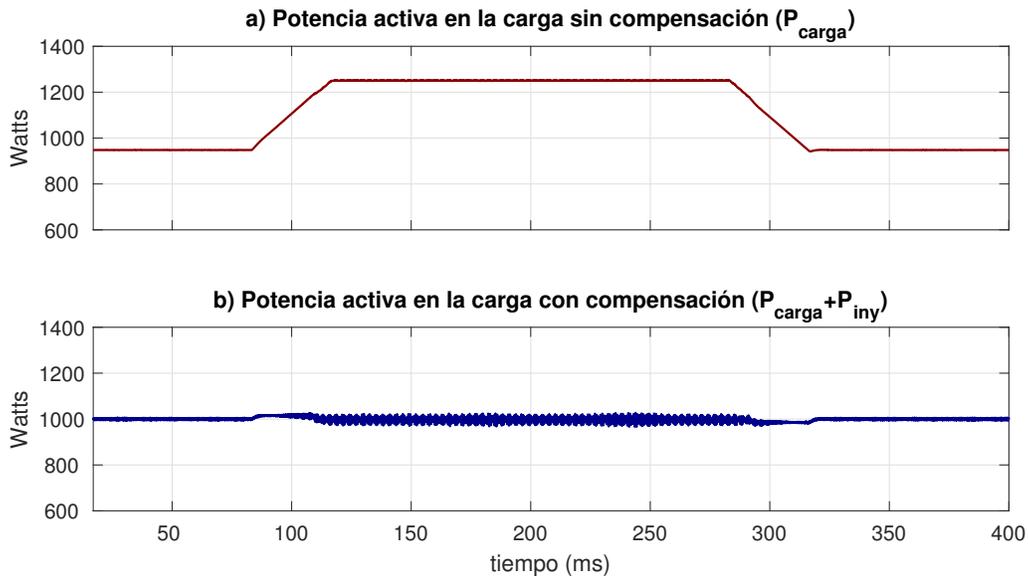
Con el swell aplicado el voltaje pico aumenta hasta los 233.48 V aproximadamente y el voltaje inyectado por los transformadores de inyección en este caso es de un valor negativo para sustraer el voltaje excedente al valor propuesto de referencia en la carga. En la Figura 5.17 se observa como el voltaje de la red aumenta durante 14 ciclos y el DVR opera rápidamente para inyectar la magnitud de voltaje apropiada para compensar el voltaje de la red entregado a la carga.

Cabe mencionar que el voltaje inyectado para la compensación es el mismo voltaje excedente en la red con respecto al voltaje nominal pero con un valor negativo. Debido a que se tiene un aumento de voltaje aplicado a la carga, también se tiene un aumento de potencia que esta consume. Como se muestra en la Figura 5.18 este exceso de potencia al ocurrir el swell aumenta hasta los 1250 W de potencia activa, pero cuando actúa el DVR se mantiene en el valor nominal.

La potencia que entregan los paneles y el convertidor boost toma valores negativos lo que significa que estos dos dispositivos no están suministrando potencia sino que están consumiendo

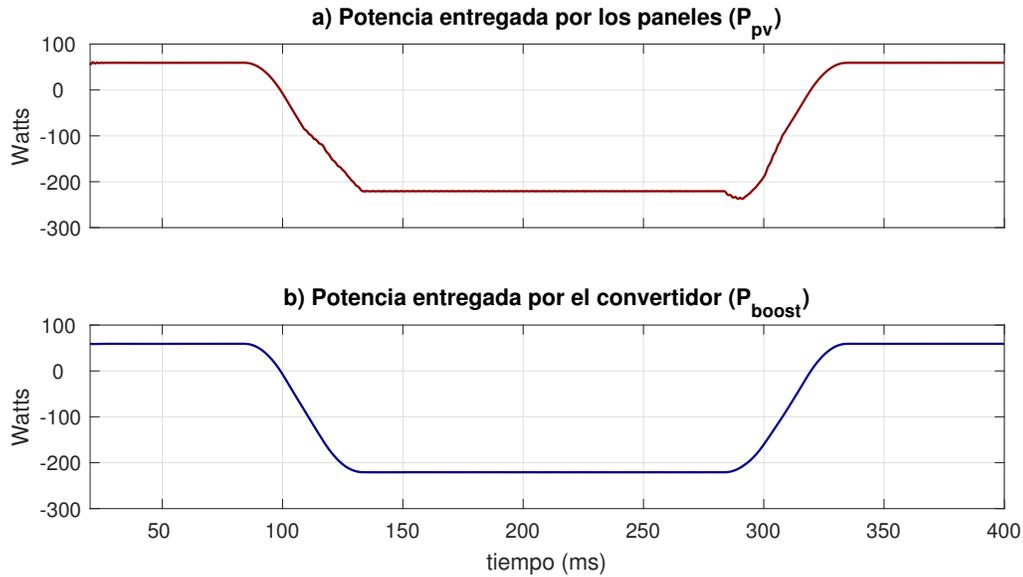


**Figura 5.17:** Voltajes para un swell de 1.3 p.u en el sistema.



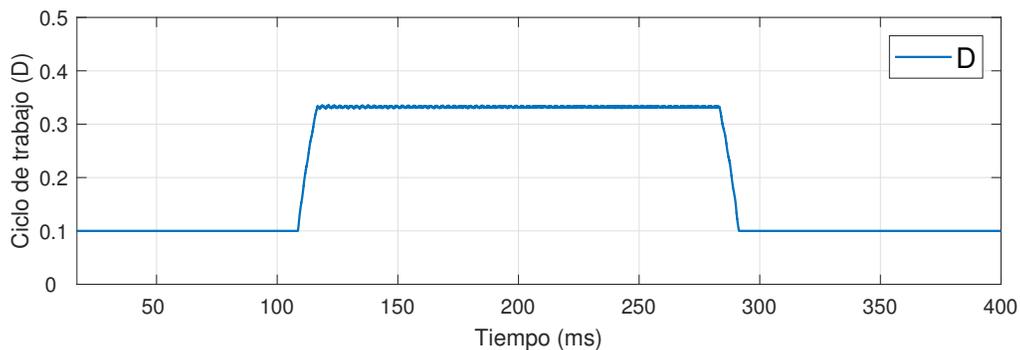
**Figura 5.18:** Potencia activa entregada por el arreglo PV para un swell de 1.3 p.u en el sistema.

o tomándola de de red a través del inversor de voltaje, y es un valor muy cercano a los 250W excedentes de la red debido a la perturbación de acuerdo con la Figura 5.19.



**Figura 5.19:** Potencia activa entregada por el arreglo PV para un swell de 1.3 p.u en el sistema.

Para inyectar un voltaje negativo mediante los transformadores de inyección y el inversor, es necesario generar el voltaje apropiado mediante el convertidor desde el arreglo PV, en este caso el sistema de control del convertidor genera solamente valores del ciclo de trabajo positivos tomando en cuenta el voltaje excedente al ocurrir el swell tal como se muestra en la Figura 5.20.

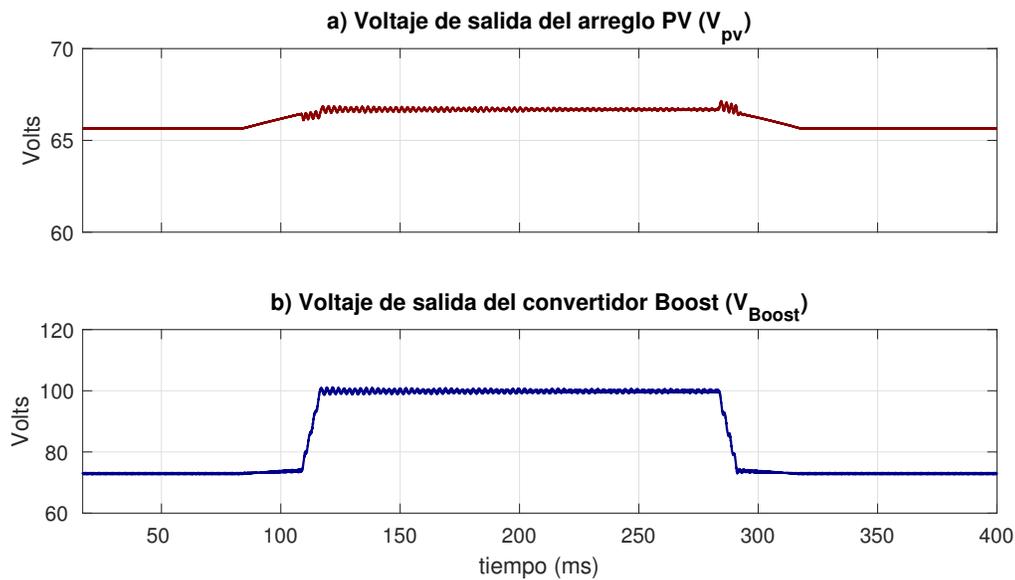


**Figura 5.20:** Ciclo de trabajo aplicado al Convertidor Boost para un swell de 1.3 p.u

En la Figura 5.21 se visualiza el voltaje que entregan los paneles solares, que en el momento de la perturbación incrementa unos cuantos volts de los 65 V que el arreglo proporciona debido

a que no se inyecta potencia a la red desde los paneles, y en el convertidor boost se tiene un voltaje aproximado de:

$$V_{\text{Boost}} = \frac{66}{1 - 0.34} = 100 \text{ V} \quad (5.3)$$



**Figura 5.21:** Voltaje del arreglo PV y del convertidor Boost para un swell de 1.3 p.u

El comportamiento de las potencias que consume la carga en el tiempo que dura la elevación de tensión se muestran en la Figura 5.22. La potencia reactiva, activa y aparente respectivamente al ocurrir el swell de voltaje sin compensación  $Q_1$ ,  $P_1$  y  $S_1$  toma los siguientes valores de acuerdo con la gráfica:

$$Q_1 = 1000 \text{ VAR}$$

$$P_1 = 1250 \text{ W}$$

$$S_1 = 1600 \text{ VA}$$

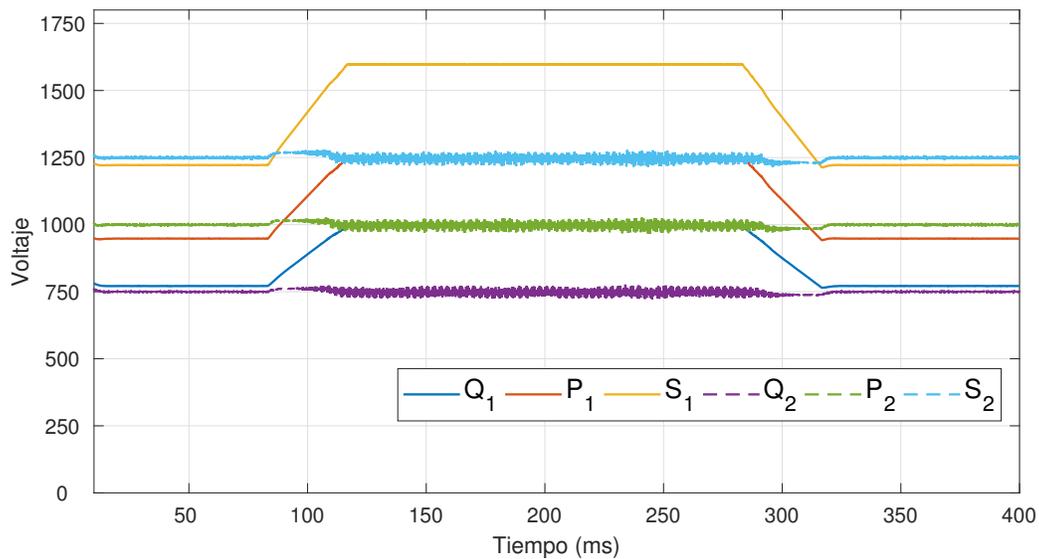
Estos valores de potencias se reducen a los valores nominales cuando el DVR realiza la

compensación de voltaje, obteniendo las siguientes cantidades:

$$Q_2 = 750 \text{ VAR}$$

$$P_2 = 1000 \text{ W}$$

$$S_2 = 1250 \text{ VA}$$

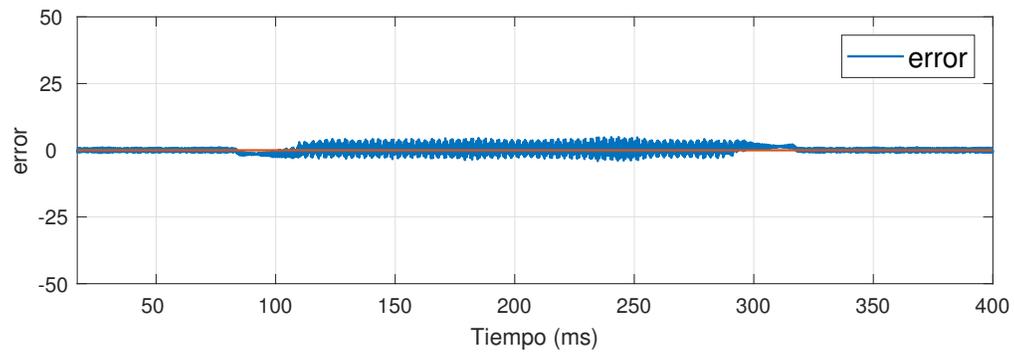


**Figura 5.22:** Potencias en la carga antes y después de la compensación para un swell de 1.3 p.u.

Por ultimo en la Figura 5.23 se muestra el error generado a la salida del comparador del voltaje de referencia  $V_{ref}$  y el voltaje medido en la carga  $V_{med}$  cuando el controlador PI realiza su función, corroborando su correcto funcionamiento ya que este error o desviación siempre tiene que tender a cero.

## 5.2. CONCLUSIÓN

En este capítulo se presentaron los resultados de simulación en MATLAB/Simulink del funcionamiento de la topología implementada del DVR soportado por paneles solares donde se simuló un sistema de distribución en baja tensión en tres estados diferentes; primero simulando



**Figura 5.23:** Error generado por la acción del controlador.

el sistema sin perturbación alguna en el sistema, después aplicando un sag de voltaje y finalmente aplicando un swell de voltaje en el SED.

Para los tres escenarios los resultados muestran que el DVR propuesto mitiga sags y swells de voltaje rápida y satisfactoriamente tomando energía desde los paneles solares.

## **Capítulo 6**

# **Conclusiones Generales y Trabajos**

## **Futuros**

En este capítulo se exponen las conclusiones obtenidas del presente trabajo, así como también se expresan algunas recomendaciones para trabajos futuros.

## **6.1. CONCLUSIONES GENERALES**

En este trabajo de tesis se presentó una topología del DVR utilizando paneles solares como una fuente de energía renovable para proporcionar soporte al DVR ante huecos y elevaciones de tensión simétricos y lograr mayor profundidad de compensación inyectando potencia activa desde el arreglo PV. Se diseñaron cada un de las partes que conforman el DVR primeramente en forma aislada con el fin de analizar su comportamiento en lazo abierto y determinar algunos parámetros para utilizarlos posteriormente cuando se simula el DVR en lazo cerrado con el sistema de control.

Se realizó la simulación de una red de distribución en baja tensión (220V) la cual alimentaba una carga específica del tipo RL con parámetros definidos previamente. Y en base a las características de la carga se dimensionó el arreglo de paneles solares para obtener la potencia activa requerida.

Los resultados de simulación realizados en MATLAB/SIMULINK demuestran la efectividad de la estructura propuesta ante este tipo de perturbaciones de corta duración mediante gráficas que proporcionan información acerca de como el DVR compensa el voltaje en la carga en todo momento.

## **6.2. RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS**

Algunas de las recomendaciones que se tienen después haber realizado este proyecto mediante simulación y de acuerdo con los resultados obtenidos son:

- Posibilidad de agregar un sistema de almacenamiento de energía tal como un banco de baterías para almacenar la energía desde los paneles solares y utilizarla cuando estos no generen electricidad.
- Cambiar el arreglo PV por paneles que tomen en cuenta los cambios de temperatura e irradiancia e implementar un algoritmo de control para el seguimiento del punto de máxima potencia.
- Reducir el numero de operaciones realizadas para implementar las transformadas de Clark y Park si es que se implementan experimentalmente.
- Tomar en cuenta las pérdidas en el convertidor elevador para obtener un voltaje de salida mas aproximado al real.

# Bibliografía

- [1] Richard E. Brown. Electric power distribution reliability. In *New York: Marcel Dekker*, volume Segunda edición, page 39-43, 2002. 8
- [2] IEEE std 1159-1995, IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality  
10
- [3] Dugan, R., Beaty, H., Santoso, S., & McGranaghan, M. Electrical Power Systems Quality  
In *McGraw Hill Professional*, volume Segunda edición, page 39-43, 2002. 12, 13
- [4] Mago. María; C. Rafael; Villegas. Angel and Guillén. Francisco. “Dispositivos para el mejoramiento de la calidad de la energía eléctrica: STATCON y DVR.”. In *Revista De Ciencia E Ingeniería*, volume vol.29, pages pp.47–54, 2008. 14, 17
- [5] A. Praveena, M. Jayashree. “Mitigation of Voltage SAG using Dynamic Voltage Restorer.”. In *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*., volume vol.3, pages pp.313–318, 2014. 14
- [6] Lozano García, J. M. “Topologías del DVR basadas en un convertidor matricial para mejorar la calidad de la energía en sistemas de distribución.”. In *Tesis para obtener el grado de doctor en ciencias en ingeniería eléctrica.*, pages 85 – 87 , Guadalajara, Jalisco, 2011.  
18
- [7] Hyeonah Park and Hyosung Kim. “PV cell modeling on single-diode equivalent circuit”. In *39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pages 1845 – 1849 , 2013. 21

- 
- [8] F. O. Hocaoglu et al. “Comparison of experimentally obtained I-V curves of different PV modules”. In *9th International Renewable Energy Congress (IREC)*, pages 1 – 4 , 2018. 23
- [9] Rivera Espinosa, M. R. “Diseño e implementación de un algoritmo para obtener el máximo punto de potencia en paneles solares”. In *Tesis para obtener el grado de maestra en ingeniería eléctrica.*, pages 10 – 11 ,2018. 24
- [10] Leopoldo Silva Bijit. Redes eléctricas In *Pearson education,S.A., Madrid, 2006*,volume Primera edición, page 274-285, 2006. 29
- [11] A. W. Leedy and M. Abdelraziq. “Modeling PV Modules Using Simulink / MATLAB under Varying Conditions”. In *2019 SoutheastCon*, page 1–6, 2019. 34
- [12] J. C. Rosas-Caro, J. M. Ramirez and P. M. Garcia-Vite. “Novel DC-DC Multilevel Boost Converter”. In *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, page 2146–2251, 2008. 38
- [13] M.R Rivera-Espinosa, A.Y Alejandre-López, J.E Pedraza-Barrón, P.M García-Vite and H.R Robles-Campos. “A high step-up DC-DC converter with MPPT for PV application”. In *IEEE International Autumn Meeting on Power Electronics and Computing (ROPEC)*, page 1–2, 2017. 39
- [14] Muhammad H. Rashid. Electrónica de potencia circuitos, dispositivos y aplicaciones. In *P. Hall, Ed. Upper Saddle River, New Jersey*,volume Tercera edición, page 226-227, 2004. 42
- [15] N. I. Raju, M. S. Islam, T. Ali and S. A. Karim. “Study of SPWM technique and simulation of designed analog circuit (Op-Amp) controlled three phase PWM inverter with harmonic reduction”. In *International Conference on Informatics, Electronics and Vision (ICIEV)*, page 1–6, 2013. 43
- [16] S. Mondal, P. K. Gayen and K. Gupta. “Study on Impact of LC-Filter Parameters Under Variable Loading Conditions of Three-Phase Voltage Source Inverter”. In *IEEE Electron Devices Kolkata Conference (EDKCON)*, page 132–136, 2018. 48

- 
- [17] T. Sundar and S. Sankar. “Simulation and investigation of prototype DVR for power flow control”. In *International Conference on Renewable Energy and Sustainable Energy (ICRESE)*, page 133–138, 2013. 50
- [18] Julio C. Rosas-Caro, Juan M. Ramírez, Pedro M. Vite García, Antonio Valderrábano y Nojja V. Vanegas Méndez. “Control de acondicionadores de potencia y dispositivos FACTS”. In *Artículo apoyado por FOMIXJAL bajo el proyecto No. 51679*, page 1–7, CINVESTAV Guadalajara. 54, 59
- [19] D. Szabó, R. Bodnár, M. Regul’a and J. Altus. “Designing and modelling of a DVR in Matlab”. In *Proceedings of the 2014 15th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*, page 229–233, 2014. 54
- [20] M. N. Tandjaoui, C. Benachaiba, O. Abdelkhalek, M. L. Doumbia and Y. Mouloudi. “Sensitive loads voltage improvement using Dynamic Voltage Restorer”. In *Proceedings of the 2011 International Conference on Electrical Engineering and Informatics*, page 1–5, 2011.
- [21] G. J. S. Dhas and T. R. D. Prakash. “A novel approach for voltage sag mitigation using facts device interline dynamic voltage restorer”. In *3rd International Conference on Electronics Computer Technology*, page 37–41, 2011.
- [22] R. Saxena and M. Kushwah. “Optimization of voltage sag/swell using dynamic voltage restorer (DVR)”. In *International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT)*, page 4046–4051, 2016.