



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Análisis de propagación de
perturbaciones ante fallas
internas en sistemas
fotovoltaicos**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Eléctrico Electrónico

P R E S E N T A

Mario Yarince Cedillo Segovia

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Juan Ramon Rodríguez Rodríguez



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2022

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mis personas favoritas:

*Mis padres, Piedad y Mario, gracias por todo el amor y apoyo a lo largo de mi vida, y
por una gran familia.*

Mi hermano, Yael, gracias por tu amistad y cariño.

*Mis mejores amigos, Edgar, Michelle, Adrián, Johan y Alfonso, gracias por la compañía
y los momentos inolvidables.*

Agradecimientos

Al **Dr. Juan Ramon Rodríguez Rodríguez** por sus enseñanzas, apoyo y tiempo brindado durante la realización de este trabajo.

Al **Dr. Vicente Torres García** por formar parte del jurado de este trabajo y por sus enseñanzas durante mi formación académica.

Al **Dr. Mario Roberto Arrieta Paternina** por formar parte del jurado de este trabajo y por sus enseñanzas durante mi formación académica.

Al **Ing. Alberto Cortez Mondragon** por formar parte del jurado de este trabajo.

Al **Dr. Néstor González Cabrera** por formar parte del jurado de este trabajo.

A la **Universidad Nacional Autónoma de México** por la oportunidad de ser parte de una gran institución, por ser mi segundo hogar en el que pude crecer personal y profesionalmente.

Por ultimo gracias al programa de apoyo a proyectos para innovar y mejorar la educación DGAPA-PAPIME “Integración teórico-practico del conocimiento adquirido en el área eléctrica-electrónica aplicado a la integración de energía solar fotovoltaica a partir del diseño de nuevas practicas de laboratorio.” con número PE108422.

Resumen

En este trabajo se presenta el desarrollo y validación de un modelos computacionales de sistemas fotovoltaicos con interconexión a una red de distribución con distintos niveles de capacidades instaladas, en los cuales para un correcto funcionamiento se implementan esquemas de control para un correcto intercambio de potencia con la red. Este modelo se desarrollo en Matlab-Simulink utilizando el modulo Simscape Electrical.

Los modelos se desarrollaron por etapas o subsistemas y una vez validado cada uno de estos se verifico el funcionamiento correcto de los sistemas.

Con los modelos computacionales validados se analizaron los comportamientos de las variables de interés en cada uno de los subsistemas ante la ocurrencia de fallas dentro y fuera del sistema.

Índice general

Agradecimientos	II
Resumen	III
Glosario de Términos y Abreviaturas	IX
1 Introducción	1
1.1 Tendencias de la energía solar fotovoltaica	1
1.2 Planteamiento del problema	4
1.3 Hipótesis	4
1.4 Propuesta de investigación	5
1.5 Objetivo	5
1.5.1 Objetivos específicos	5
1.6 Justificación	6
1.7 Metodología	6
2 Estado del Arte	8
2.1 Electrónica de potencia y energías renovables	8
2.2 Concepto general de los sistema fotovoltaicos	10
2.2.1 Sistemas fotovoltaicos en México	11
2.3 Fallas más comunes en sistemas fotovoltaicos	12
2.4 Accidentes en el mundo debido a fallas en sistemas fotovoltaicos	14
2.5 Conclusiones Particulares	15
3 Operación Básica de un Sistema Fotovoltaico	16
3.1 Celdas fotovoltaicas	16
3.1.1 Descripción	16
3.1.2 Modelo simple	17
3.1.3 Modelo de arreglo	21
3.2 Convertidor elevador DC/DC	23
3.2.1 Operación básica del convertidor boost	23
3.2.2 Seguimiento del Punto de Máxima Potencia	25
3.2.3 Control en lazo cerrado	27
3.3 Inversor VSC: Modelado y control	29
3.3.1 Inversor VSC trifásico	29
3.3.2 Esquema de control de interconexión	31

3.4	Simulación de sistemas fotovoltaicos	32
3.5	Conclusiones particulares	35
4	Propuesta: Análisis de propagación de perturbaciones	36
4.1	Convertidor elevador DC/DC	36
4.1.1	Corto circuito	36
4.1.2	Circuito abierto	39
4.2	VSC	42
4.2.1	Corto circuito	42
4.2.2	Circuito abierto	46
4.3	Desbalances en la red en la red de distribución	49
4.3.1	Falla monofásica con resistencia a tierra	49
4.4	Conclusiones particulares	52
5	Conclusiones	53
5.1	Aportes	53
5.2	Trabajos futuros	53
5.3	Discusión	54
5.4	Conclusiones finales	54

Índice de figuras

1.1	Energía eléctrica renovable generada en el mundo, 1990-2019 [1]	1
1.2	Capacidad fotovoltaica instalada en el mundo, 2010-2020 [2]	2
1.3	Costos Totales Promedio Globales por kW Instalado, 2010-2020 [5]	3
1.4	Capacidad fotovoltaica instalada en México, 2010-2020 [2]	4
1.5	Modelo general del sistema fotovoltaico en estudio	5
2.1	Evolución de los dispositivos semiconductores. [8]	8
2.2	Fuente y carga interconectadas por un convertidor electrónico de potencia. [25]	10
2.3	Clasificación de los sistemas fotovoltaicos [11]	11
2.4	Vista aérea del parque solar Don José. [12]	12
2.5	Tipos de Arco en módulos Fotovoltaicos. [13]	13
2.6	Punto Caliente en Módulo Fotovoltaico. [13]	13
2.7	Incendios en Sistemas Fotovoltaicos de Walmart. [15][16]	14
2.8	Incendio en módulo de transformación de Aurora Solar 1 [17]	14
3.1	Funcionamiento de una celda fotovoltaica [19]	17
3.2	Circuito equivalente para el modelo simple de una celda fotovoltaica. [20] .	18
3.3	Curvas características de una celda fotovoltaica. [22]	19
3.4	Curva I-V típica de una celda ante cambios en las condiciones de prueba. [23]	20
3.5	Curva P-V típica de una celda ante cambios en las condiciones de prueba. [23]	21
3.6	Composición de arreglos fotovoltaicos.	22
3.7	Circuito del convertidor boost.	23
3.8	Circuito del convertidor boost en distintos estados.	24
3.9	Características principales de los métodos MPPT. [28]	26
3.10	Diagrama de flujo del algoritmo P&O. [29]	27
3.11	Diagrama de bloques de un lazo de control PID de una entrada y una salida.	28
3.12	Inversor VSC trifásico de dos pulsos.	29
3.13	Diagrama de bloques del sistema con controlador de interconexión.	32
3.14	Modelo de sistema fotovoltaico.	32
3.15	Voltaje, corriente y potencia del arreglo fotovoltaico.	33
3.16	Voltajes y corriente del convertidor boost.	33
3.17	Potencia activa y reactiva del sistema fotovoltaico.	34
3.18	Voltajes y corrientes en el punto de interconexión.	34
3.19	Voltajes y corrientes en la red de distribución.	35

4.1	Voltaje, corriente y potencia del arreglo fotovoltaico.	36
4.2	Voltajes y corriente en el convertidor boost.	37
4.3	Potencia activa y reactiva del sistema fotovoltaico.	37
4.4	Voltajes y corrientes en el punto de interconexión.	38
4.5	Distorsión armónica total en el punto de interconexión.	38
4.6	Voltajes y corrientes en la red de distribución.	39
4.7	Voltaje, corriente y potencia del arreglo fotovoltaico.	39
4.8	Voltajes y corriente en el convertidor boost.	40
4.9	Potencia activa y reactiva del sistema fotovoltaico.	40
4.10	Voltajes y corrientes en el punto de interconexión.	41
4.11	Distorsión armónica total en el punto de interconexión.	41
4.12	Voltajes y corrientes en la red de distribución.	42
4.13	Voltaje, corriente y potencia del arreglo fotovoltaico.	42
4.14	Voltajes y corriente en el convertidor boost.	43
4.15	Potencia activa y reactiva del sistema fotovoltaico.	44
4.16	Voltajes y corrientes en el punto de interconexión.	44
4.17	Distorsión armónica total en el punto de interconexión.	45
4.18	Voltajes y corrientes en la red de distribución.	45
4.19	Voltaje, corriente y potencia del arreglo fotovoltaico.	46
4.20	Voltajes y corriente en el convertidor boost.	46
4.21	Potencia activa y reactiva del sistema fotovoltaico.	47
4.22	Voltajes y corrientes en el punto de interconexión.	47
4.23	Distorsión armónica total en el punto de interconexión.	48
4.24	Voltajes y corrientes en la red de distribución.	48
4.25	Voltaje, corriente y potencia del arreglo fotovoltaico.	49
4.26	Voltajes y corriente en el convertidor boost.	49
4.27	Potencia activa y reactiva del sistema fotovoltaico.	50
4.28	Voltajes y corrientes en el punto de interconexión.	50
4.29	Distorsión armónica total en el punto de interconexión.	51
4.30	Voltajes y corrientes en la red de distribución a 5 [km].	51
4.31	Voltajes y corrientes en la red de distribución a 20 [km].	52

Índice de tablas

- 1.1 Resumen de tecnologías en celdas fotovoltaicas. [4] 2
- 2.1 Principales Centrales Fotovoltaicas Privadas en México a Diciembre 2018.
[10] 12

Glosario de Términos y Abreviaturas

Abreviatura	Descripción
AC	Corriente Alterna
DC	Corriente Directa
VSC	Voltage Source Converter
MPPT	Maximum Power Point Tracking
FV	Fotovoltaico
PWM	Pulse With Modulation

Símbolo	Unidad	Descripción
V	V	Voltaje
I	A	Corriente
R	Ω	Resistencia
P	W	Potencia Activa
Q	VA _r	Potencia Reactiva
I	$\frac{W}{m^2}$	Irradiancia
T	$^{\circ}C$	Temperatura
D	1	Ciclo de Trabajo

Capítulo 1

Introducción

1.1. Tendencias de la energía solar fotovoltaica

La energía eléctrica es uno de los factores mas importantes para el desarrollo económico de una nación, debido a lo que representa y al constante aumento de población, es necesario poder satisfacer la creciente demanda de energía eléctrica con el menor impacto ambiental posible, por estas razones las energías renovables se han posicionado como la mejor alternativa para enfrentar dichos requerimientos.

La energía solar fotovoltaica se encuentra en la tercera posición a nivel mundial, por debajo de la energía hidroeléctrica y eólica, con $680,952 [GWh]$ de energía eléctrica producida en el año 2019 mostrado en la Figura 1.1 tomando en cuenta todos los tipos de sistemas de generación fotovoltaica.

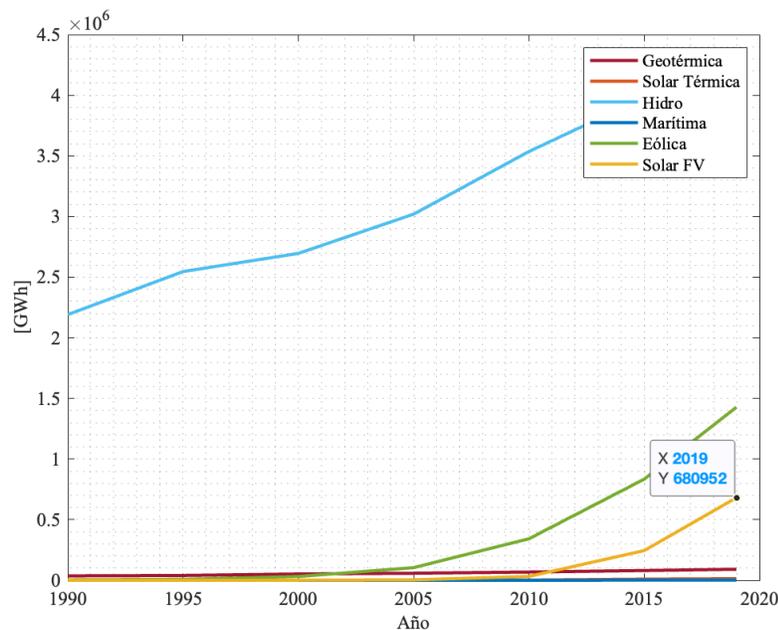


Figura 1.1: Energía eléctrica renovable generada en el mundo, 1990-2019 [1]

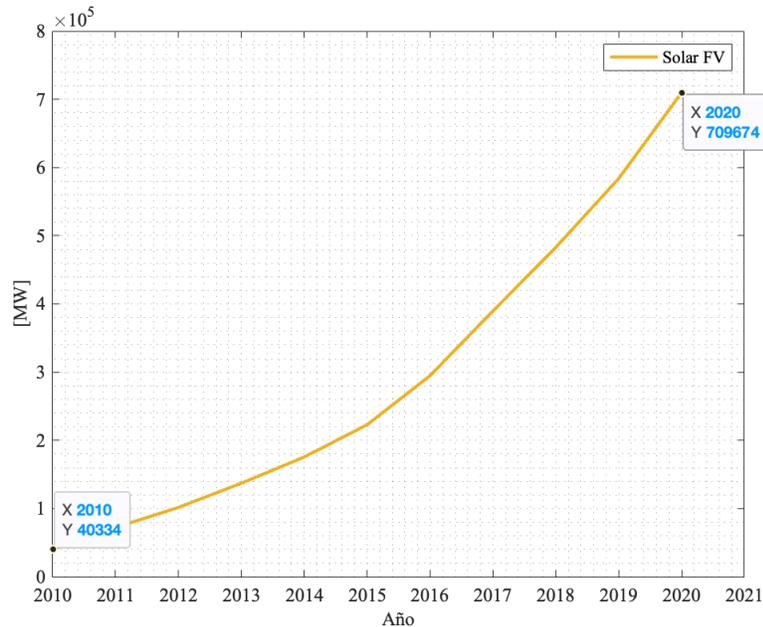


Figura 1.2: Capacidad fotovoltaica instalada en el mundo, 2010-2020 [2]

En la Figura 1.2 se observa la tendencia de crecimiento en la capacidad instalada de energía solar fotovoltaica en el mundo del 2010 al 2020 de solo 40,334[MW] (3%) a 709,674[MW] (24.3%), además de acuerdo con [3, pag. 37] durante el año 2021 la capacidad instalada de energía solar fotovoltaica en el mundo creció 101[MW] y se espera un crecimiento de 119[MW] para 2022 considerando los sistemas fotovoltaicos interconectados, industriales, comerciales, residenciales y autónomos.

El crecimiento acelerado de la generación fotovoltaica es consecuencia de la continua reducción en los costos de instalación y mantenimiento producto de la investigación científica y el desarrollo tecnológico.

Tabla 1.1: Resumen de tecnologías en celdas fotovoltaicas. [4]

Tecnología de las Celdas FV	Eficiencia [%]	Porcentaje de Mercado [%]	Aplicaciones
Silicio Monocristalino	27.6	24	Aplicaciones civiles (Residencial, Comercial, Sistemas a gran escala, Dispositivos, etc.)
Silicio Policristalino	22.3	69	
HIT	26.6	<1	
Thin Film (Película Delgada)	21.2	<1	
CIGS (Cooper Indium Gallium Selenide)	23.3	<2	
CdTe (Cadmium Telluride)	22.1	3	
Silicio Amorfo	14	3	Aplicaciones aeroespaciales
GaAs (Gallium Arsenide)	30.5	No comercial	
Multi-junction	46		
Orgánicas	15.6		Investigación
Dye-sensitized	11.9		
Perovskite (Calcium Titanium Oxide)	28		

En la Tabla 1.1 se muestra una comparación de la eficiencia, porcentaje de participación en el mercado y aplicación por cada tecnología siendo el Silicio Policristalino la tecnología predominante para los sistemas fotovoltaicos residenciales, industriales, de utilización o gran escala, aislados, etc. Si bien existen tecnologías que otorgan una mayor eficiencia (GaAs, Multi-junction) las condiciones necesarias para lograrla conllevan costos mucho mas elevados.

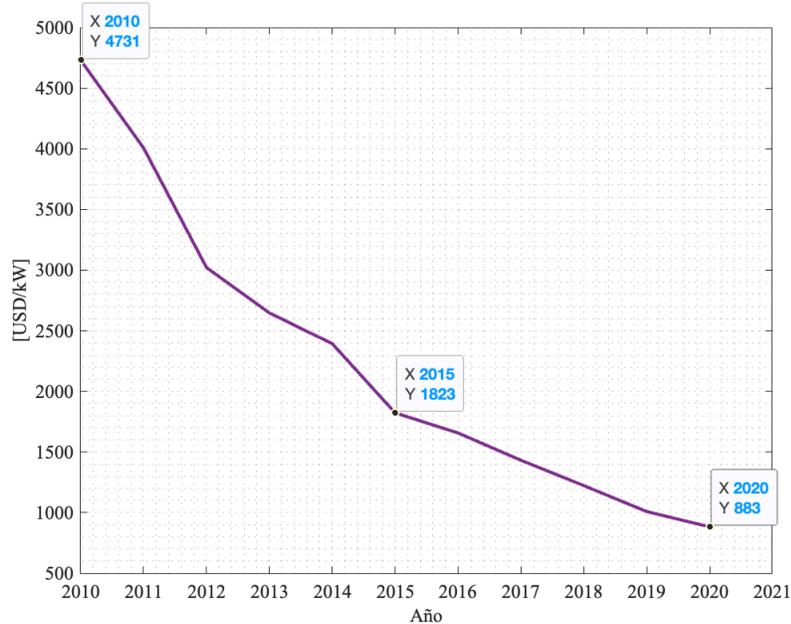


Figura 1.3: Costos Totales Promedio Globales por kW Instalado, 2010-2020 [5]

Como se muestra en la Figura 1.3 los costos totales globales por kW instalado han presentado una disminución sostenida del 2010 al 2020 pasando de $4731[USD/kW]$ a $883[USD/kW]$.

La región en la que se encuentra México lo coloca como uno de los países con el mayor potencial de producción de energía solar fotovoltaica en el mundo, con un promedio de irradiación solar diaria de $6.07[kWh/m^2]$, teniendo niveles máximos de $8.06[kWh/m^2]$ en el norte del país. [6] [7]

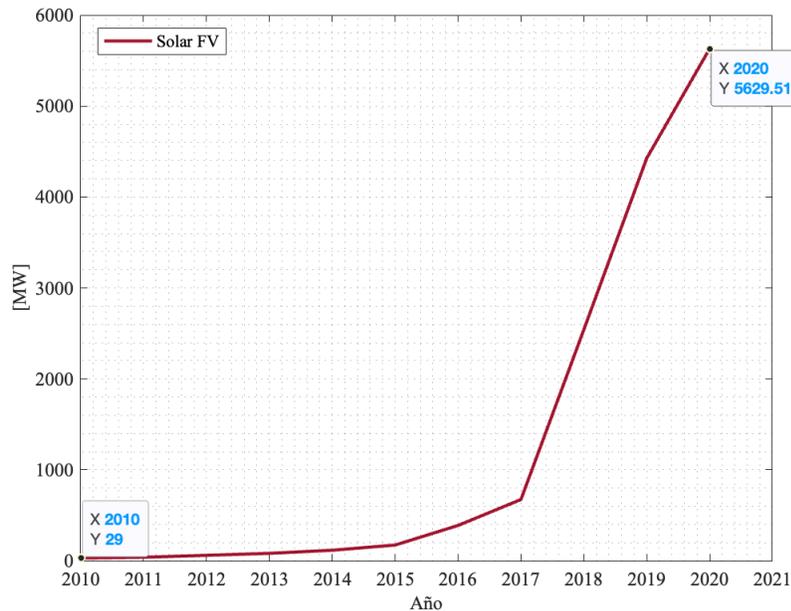


Figura 1.4: Capacidad fotovoltaica instalada en México, 2010-2020 [2]

Teniendo en cuenta la ubicación geográfica y la tendencia en la reducción de costos es posible lograr un incremento importante en la capacidad de generación fotovoltaica instalada de los años 2010 a 2020 mostrada en la Figura 1.4.

1.2. Planteamiento del problema

La generación de energía solar fotovoltaica a nivel residencial, comercial e industrial ha tenido un aumento acelerado en la última década como resultado de las necesidades medioambientales, políticas gubernamentales y la reducción continua en los costos de los equipos fotovoltaicos. Este aumento en la generación de energía eléctrica impacta de forma positiva en los objetivos mundiales de mitigación de gases de efecto invernadero, sin embargo se vuelve necesario considerar el funcionamiento bajo contingencia de los sistemas fotovoltaicos.

El desempeño inadecuado a nivel convertidor puede provocar problemas de operación como afectaciones en la calidad de la energía, distorsión armónica o desbalances de corriente que son difíciles de detectar por las protecciones a nivel granja y que a su vez puede provocar problemas de sobrecalentamiento, arcos eléctrico y deterioro de los componentes lo cual finalmente se traduce a pérdidas económicas y problemas de seguridad.

1.3. Hipótesis

El análisis numérico de la operación no deseada o fallas internas en los convertidores de las granjas fotovoltaicas interconectadas con redes de distribución generara una serie

de datos clave útiles para la implementación de sistemas de detección, alerta y protección a nivel convertidor que son difíciles de detectar a nivel granja. Por lo cual se prevé evitar daños a las redes eléctricas y a los equipos que conforman los sistemas fotovoltaicos.

1.4. Propuesta de investigación

A continuación se muestra el modelo general del sistema fotovoltaico propuesto para el desarrollo de esta investigación.

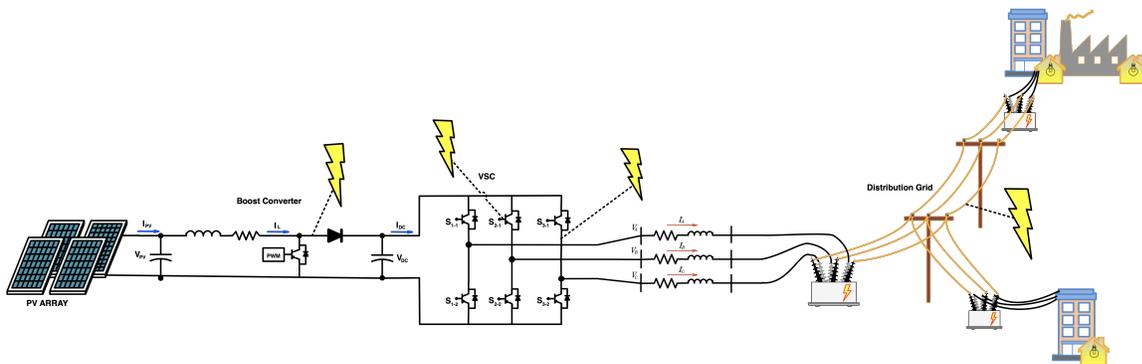


Figura 1.5: Modelo general del sistema fotovoltaico en estudio

El sistema fotovoltaico en análisis se compone de un convertidor elevador de DC/DC (*Boost Converter*), una fuente convertidora de voltaje DC/AC de seis pulsos (*Voltage Source Converter*), un filtro *RL* y un transformador elevador trifásico para una correcta interconexión con la red de distribución.

1.5. Objetivo

Implementar modelos computacionales en Matlab Simulink que reproduzcan el comportamiento inadecuado de sistemas fotovoltaicos interconectados con redes de distribución para 10 [kW], 50 [kW] y 500 [kW] de capacidad utilizando algoritmos de control de voltaje en corriente directa e intercambio de potencia activa y reactiva.

1.5.1. Objetivos específicos

1. Aplicar fallas internas y externas en los sistemas, tales como: corto circuito en interruptores de potencia, circuito abierto en interruptores de potencia, corto circuito y circuito abierto en convertidores elevadores de DC/DC, así como fallas monofásicas en las redes de distribución.
2. Generar una base de datos con la información obtenida para una futura clasificación de fallas y protecciones eléctricas.

1.6. Justificación

La instalación masiva de sistemas fotovoltaicos sin duda conlleva a una disminución en la generación de gases contaminantes contribuyendo así a disminuir los efectos de cambio climático. En este escenario debe de considerarse de forma adjunta los posibles riesgos que puede conllevar la operación inadecuada de dichos sistemas, como sobrecalentamiento de los paneles o de los sistemas de conversión por diferentes causas. Por lo anterior es importante considerar el análisis de las fallas internas de los sistemas de conversión de energía, a fin de evitar posibles daños materiales o incluso daños físicos en las personas.

Además, es importante resaltar que el análisis en campo sobre la operación inadecuada de los sistemas fotovoltaicos conlleva un excesivo costo monetario y practicas poco seguras de reproducción.

Finalmente, en este trabajo de tesis se busca contribuir en el análisis de las formas inadecuadas de operación de los sistemas fotovoltaicos en un ambiente de simulación, en donde se espera recolectar una serie de datos a fin de identificar y aislar la operación no adecuada de los sistemas fotovoltaicos y con ello evitar los daños físicos o perdidas materiales debido a operaciones inseguras.

1.7. Metodología

El método de trabajo utilizado para completar los objetivos de este proyecto de tesis se describe a continuación:

- **Recolección de información y fuentes bibliográficas:** En esta etapa se pretende recabar información sobre el funcionamiento de los sistemas fotovoltaicos por medio de artículos científicos, libros, vídeos, etc. Para conocer a detalle su funcionamiento en conjunto y de cada una de las partes que los componen.
- **Análisis por etapas de un sistema fotovoltaico:** El análisis por etapas consistirá en el estudio de modelos computacionales en Matlab Simulink que emulen el comportamiento de los dispositivos a fin de conocer sus curvas de operación, modelo matemático y características de operación.
- **Operación en conjunto de un sistema fotovoltaico:** Para esta parte se unirán los modelos por etapa estudiados en la sección anterior con el objetivo de observar el comportamiento de un sistema fotovoltaico interconectado a la red eléctrica realizando esto en la plataforma Matlab Simulink.
- **Generación de fallas aleatorias:** Estudiar el comportamiento de un sistema fotovoltaico interconectado a la red eléctrica cuando se presentan distintas fallas como: fallas por arco eléctrico en un panel o en un grupo de módulos, fallas en los interruptores de potencia, fallas en sensores, fallas en etapas de filtrado y desbalances en la red eléctrica.

- Análisis de datos obtenidos: Con las observaciones y resultados de la etapa anterior se pretende derivar una Tabla de características sobre la operación de un sistema fotovoltaico, clasificando como: operación segura, operación inadecuada, operación no adecuada y sistema fuera de operación.

Capítulo 2

Estado del Arte

2.1. Electrónica de potencia y energías renovables

La invención del rectificador de arco de mercurio en el año 1900 es considerado como el punto de partida de la electrónica de potencia. Posteriormente la aparición de nuevos dispositivos semiconductores fomentó el desarrollo de la electrónica de potencia, en la Figura 2.1 se muestra el desarrollo de los dispositivos semiconductores más importantes desde la invención del diodo.

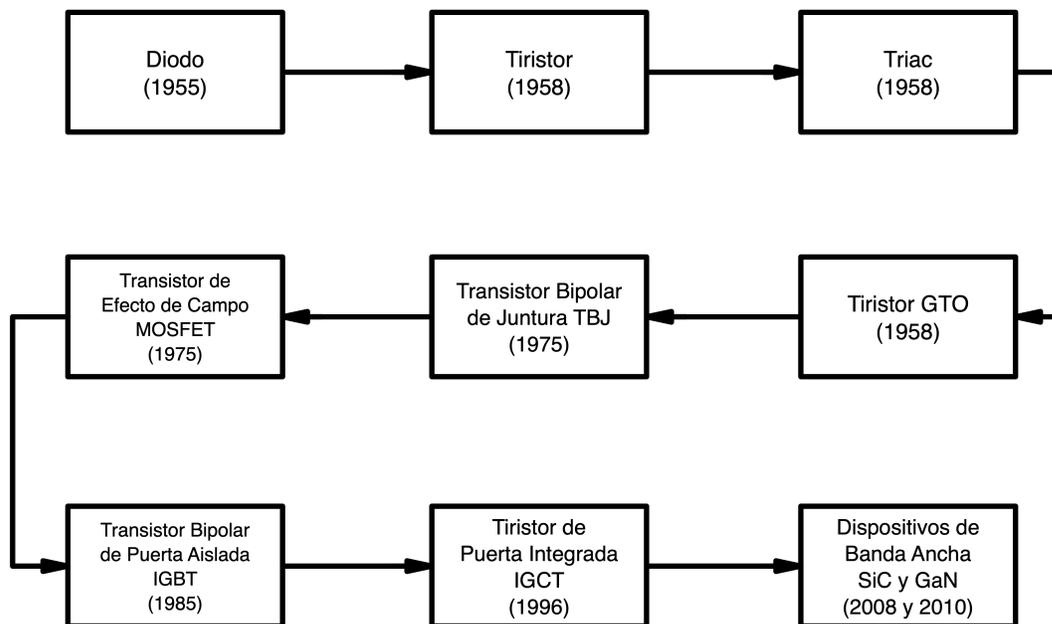


Figura 2.1: Evolución de los dispositivos semiconductores. [8]

La electrónica de potencia es una materia multidisciplinaria que combina la eléctrica de potencia, teoría de control, electrónica convencional y el electromagnetismo para aplicaciones en máquinas eléctricas y sistemas eléctricos de potencia.

El comienzo de la era de las redes inteligentes a posicionado a la electrónica de potencia como una disciplina fundamental debido a la amplia gama de aplicaciones que otorgan los dispositivos semiconductores, en su operación como interruptores, para convertir y controlar la energía eléctrica [8]. A continuación se enlistan algunos de los convertidores electrónicos de potencia más utilizados:

- Conversión de corriente alterna a corriente directa (AC/DC)
 - Rectificador: Polarizando inversamente los diodos se eliminan las partes negativas de las señales de corriente/voltaje alternas, pueden ser de media onda o de onda completa.
- Conversión de corriente directa a corriente alterna (DC/AC)
 - Inversor: Con la apertura y cierre de transistores es posible lograr una forma de onda senoidal a partir de una señal de voltaje/corriente directa.
- Conversión de corriente directa a corriente directa (DC/DC)
 - Convertidor elevador (Boost Converter): Circuito capaz de elevar el nivel de voltaje de DC que recibe.
 - Convertidor reductor (Buck Converter): Circuito que reduce el nivel de voltaje de DC que recibe.
 - Convertidor elevador-reductor (Buck-Boost Converter): Circuito que además de reducir o aumentar el nivel de voltaje a la entrada puede invertir el signo del mismo.
- Conversión de corriente alterna a corriente alterna (AC/AC)
 - Regulador de voltaje: Uno de los circuitos mas utilizados que ayuda a mantener la amplitud de una señal de voltaje aun cuando existan cambios en la carga.
 - Cambiador de frecuencia: Como su nombre lo indica realiza cambios la frecuencia de la señal que recibe para poder cumplir con las características de la energía que demanda la carga, usados principalmente para motores.

El objetivo de un convertidor electrónico de potencia es hacer coincidir el voltaje y la corriente demandados por la carga con los que otorga la fuente. [25]



Figura 2.2: Fuente y carga interconectadas por un convertidor electrónico de potencia. [25]

Es decir, un convertidor electrónico de potencia funciona como una interfaz para la correcta interacción de las fuentes de energía y los requerimientos de las cargas, como se muestra en la Figura 2.2. La interconexión de la fuente y la carga puede requerir más de un convertidor, por ejemplo la corriente directa de un arreglo de módulos fotovoltaicos debe ser elevada antes de ser convertida a corriente alterna, es decir para que la energía eléctrica generada pueda ser utilizada debe pasar por un convertidor elevador (Boost) y posteriormente por un inversor.

Además de convertir, los circuitos electrónicos de potencia pueden ser usados como compensadores estáticos de potencia reactiva con el objeto de incrementar la capacidad de transferencia de potencia en las líneas de transmisión compensando las caídas de voltaje producto de la demanda excesiva de potencia en los nodos.

El acondicionamiento de la energía eléctrica a través de los avances tecnológicos en electrónica de potencia es la clave para poder obtener el máximo beneficio de la infraestructura de transmisión, distribución y suministro del país, y al mismo tiempo incrementar la integración de las fuentes de energía renovable en la matriz energética y de esta forma satisfacer la creciente demanda de energía eléctrica.

2.2. Concepto general de los sistema fotovoltaicos

Los sistemas fotovoltaicos, también llamados parques solares o granjas fotovoltaicas, son capaces de generar energía eléctrica aprovechando el efecto fotoeléctrico presente en algunos materiales semiconductores. Estos sistemas fotovoltaicos pueden ser clasificados de acuerdo con su interacción o falta de esta con la red eléctrica. A continuación se presenta un diagrama en el que se observa la clasificación de los sistemas fotovoltaicos aislados e interconectados, así como sus variantes.

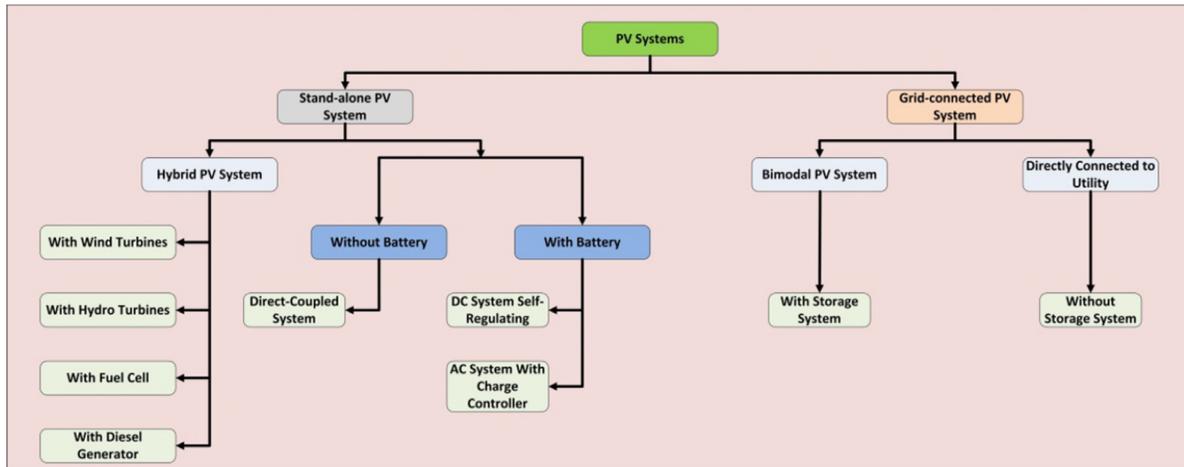


Figura 2.3: Clasificación de los sistemas fotovoltaicos [11]

Los sistemas fotovoltaicos en isla o off grid pueden ser con o sin sistema de almacenamiento y híbridos, es decir con un sistema para generación de energía complementario o de respaldo con turbinas eólicas, hidráulicas, celdas de combustible o con generadores de combustible fósil. Por otro lado los sistemas interconectados presentan dos clasificaciones con sistema de almacenamiento mientras que los sistemas que no cuentan con uno entregan toda la energía disponible a la red eléctrica.

Sin embargo, los sistemas fotovoltaicos también pueden clasificarse de acuerdo con su propósito e incluso por su capacidad de generación, por ejemplo:

- **Sistemas utilitarios:** De grandes capacidades, con capacidades instaladas $> 1[MW]$ y cuentan con interconexión a la red general de transmisión.
- **Industriales:** De capacidades medias con objeto de reducir el consumo excesivo y con interconexión con redes de transmisión o distribución.
- **Residenciales:** Con capacidades bajas destinadas al auto-consumo y con interconexión a las redes de distribución para inyectar excedentes de generación.

El componente principal de un sistema fotovoltaico son los módulos mismos que están compuestos por celdas fotovoltaicas conectadas que se encargan de generar un flujo de electrones a partir de la energía de los fotones. Estos dispositivos pueden estar fabricados con distintos componentes como se menciona en la Tabla 1.1, sin embargo para un funcionamiento óptimo de los sistemas se utilizan convertidores electrónicos de potencia, inversores y elevadores, así como sistemas de control de potencia y sistemas seguidores

2.2.1. Sistemas fotovoltaicos en México

En México los sistemas fotovoltaicos con la mayor capacidad instalada han sido construidos por empresas privadas funcionando bajo esquemas de auto abastecimiento y/o generación. A continuación se muestra un resumen de las centrales fotovoltaicas privadas

con mayor capacidad instalada.

Tabla 2.1: Principales Centrales Fotovoltaicas Privadas en México a Diciembre 2018. [10]

Nombre	Empresa	Esquema	Capacidad Instalada [MW]
Villanueva Solar Uno	Enel Green Power México	Generación	362.96
Villanueva Solar Tres	Enel Green Power México	Generación	274.97
Parque Solar Don José	Enel Green Power México	Generación	228
Iberdrola Renovables Centro	Iberdrola Renovables México	Generación	170
Solem Uno	Cubico Sustainable Investments & Alten Renewable Energy América	Generación	150
Iberdrola Renovables Noreste	Iberdrola Renovables México	Generación	100
Solar Park Viborillas	Jinko Solar	Generación	100

En particular el parque solar Don José cuenta con una capacidad instalada de 228[MW] en un área de 1300 hectáreas. Conformado por 860,000 módulos fotovoltaicos de 225[W] y 230[W] montados en sistemas seguidores que mantienen la irradiación solar perpendicular optimizando la generación.



Figura 2.4: Vista aérea del parque solar Don José. [12]

2.3. Fallas más comunes en sistemas fotovoltaicos

Los sistemas fotovoltaicos de cualquier tamaño son propensos de tener fallas producto de la degradación o mala instalación de sus componentes. El incremento en el uso de estos sistemas a nivel mundial trae consigo información sobre las fallas más comunes y como pueden ser detectadas.

En la mayoría de las ocasiones que se presenta una falla esta se traduce en fuego, de acuerdo con [13] los factores que conducen a incendios en sistemas fotovoltaicos son: Errores en la instalación de los componentes, calidad de los componentes instalados y otras

razones como puntos calientes, capacidad de desalojo de la energía, arcos de DC en cajas combinadoras, módulos fotovoltaicos y cableado, y envejecimiento de los interruptores (transistores) en los inversores.

Las fallas por arco pueden clasificarse en tres tipos siendo la primera de estas la falla de arco serie la cual puede ocurrir en los puntos de soldadura dentro del panel, los conectores en los módulos y los inversores y los puntos de unión entre cables. En segundo lugar esta la falla de arco paralelo la cual ocurre cuando se presentan anomalías en el aislamiento de los conductores, por grietas provocadas por la exposición a las condiciones climáticas, mordeduras de animales y los daños mecánicos. Finalmente la falla de arco a tierra se presenta cuando la corriente fluye hacia el suelo desde algún conductor.

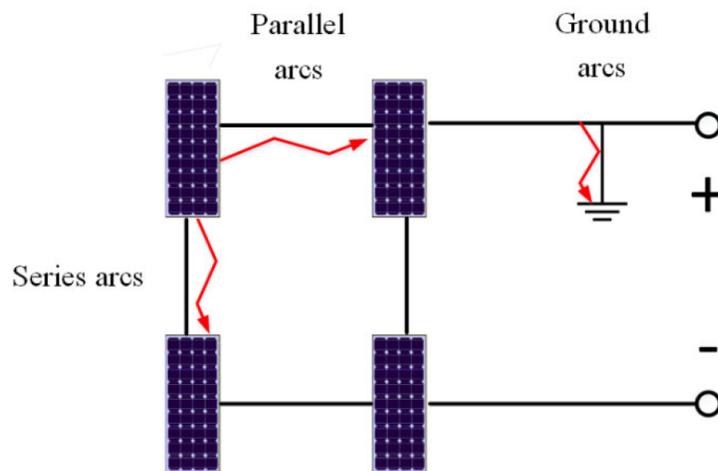


Figura 2.5: Tipos de Arco en módulos Fotovoltaicos. [13]

Mientras que los puntos calientes se producen debido a la generación no uniforme de las celdas dentro del módulo fotovoltaico producto de los efectos de sombra que ocasionan las hojas, el polvo, etc. La generación no uniforme eleva la temperatura de solo algunas celdas dentro del módulo a un límite para el que los materiales de fabricación no están diseñados para operar provocando efectos visibles, marcas, y en el peor de los casos combustión como se muestra en la Figura 2.6.



Figura 2.6: Punto Caliente en Módulo Fotovoltaico. [13]

2.4. Accidentes en el mundo debido a fallas en sistemas fotovoltaicos

Un ejemplo concreto de los accidentes son los incendios en supermercados de la empresa Walmart en Estados Unidos los cuales después de siete incendios desconectaron los sistemas instalados en 240 de sus tiendas y además demandaron a la empresa instaladora por ignorar las reglas básicas de seguridad para realizar las instalaciones, así como imprudencia en la operación y mantenimiento de los sistemas fotovoltaicos.



Figura 2.7: Incendios en Sistemas Fotovoltaicos de Walmart. [15][16]

Los accidentes también pueden ser causados por factores no humanos como el incendio en la planta generadora Aurora Solar 1, ubicada en el estado de Baja California Sur, que se muestra en la Figura 2.8 el cual fue provocado por un corto circuito en un módulo de transformación.



Figura 2.8: Incendio en módulo de transformación de Aurora Solar 1 [17]

2.5. Conclusiones Particulares

La modernización de las redes de transmisión y distribución junto con el aumento de la demanda de la energía eléctrica hacen que el uso de los dispositivos electrónicos de potencia sea fundamental para poder acondicionar y utilizar la energía proveniente de la amplia gama de opciones de generación disponibles. Además de la electrónica de potencia los sistemas de control son esenciales para la correcta integración de las energías convencionales y renovables, particularmente la energía solar fotovoltaica en la que se centra este trabajo de investigación.

La instalación de sistemas fotovoltaicos industriales, residenciales y comerciales se debe realizar con los estándares más altos de seguridad disponibles para poder garantizar una operación correcta y segura que otorgue los mayores beneficios posibles.

La operación segura de los sistemas de generación de energía eléctrica es uno de los factores importantes, por tanto es substancial tener en cuenta las fallas que pueden presentarse en los sistemas fotovoltaicos y los efectos adversos que causan a los equipos, a la red eléctrica, a las personas y a la calidad de la energía.

Capítulo 3

Operación Básica de un Sistema Fotovoltaico

A lo largo de este capítulo se describe el principio de funcionamiento de las celdas fotovoltaicas y el modelo de arreglo, así como el *VSC* trifásico de seis pulsos y el convertidor elevador ó convertidor *Boost*. Adicionalmente se explica la implementación de los algoritmos de control de voltaje en corriente directa, intercambio de potencia activa y reactiva y de seguimiento del punto de máxima potencia (*MPPT*) mediante perturbación y observación.

3.1. Celdas fotovoltaicas

3.1.1. Descripción

El efecto fotoeléctrico es el fenómeno físico que describe la transferencia de energía de un fotón hacia un electrón, dada por la siguiente ecuación. [11]

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (3.1)$$

Donde:

- E es la energía del fotón J
- h es la constante de Plank ($6.626 \times 10^{-34} [J \cdot s]$)
- c es la velocidad de la luz ($3.10 \times 10^8 [\frac{m}{s}]$)
- λ es la longitud de onda $[m]$

Cuando un fotón incide en una celda fotovoltaica, formada por la unión de dos tipos de semiconductores tipo P y N, los electrones de la capa de conducción saltan la banda prohibida formando un flujo de electrones en un circuito cerrado, también llamado corriente eléctrica. Este proceso se muestra gráficamente en la Figura 3.1.

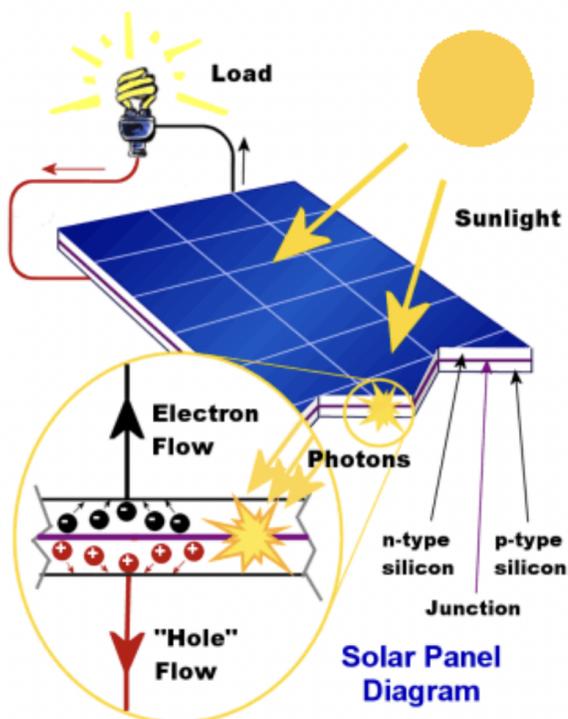


Figura 3.1: Funcionamiento de una celda fotovoltaica [19]

La cantidad de energía producida por la celda fotovoltaica depende de la intensidad de la radiación que incide sobre la misma y el tipo de material semiconductor por el que esta constituida.

3.1.2. Modelo simple

El modelo simple o modelo de un diodo es la opción frecuentemente utilizada para la mayoría de los análisis y publicaciones con este es posible determinar cinco parámetros con simpleza y exactitud suficiente. Por otra parte el modelo de dos diodos utilizado en menor medida permite obtener siete parámetros para análisis incrementando la dificultad del mismo sin un beneficio sustancial en exactitud. [20]

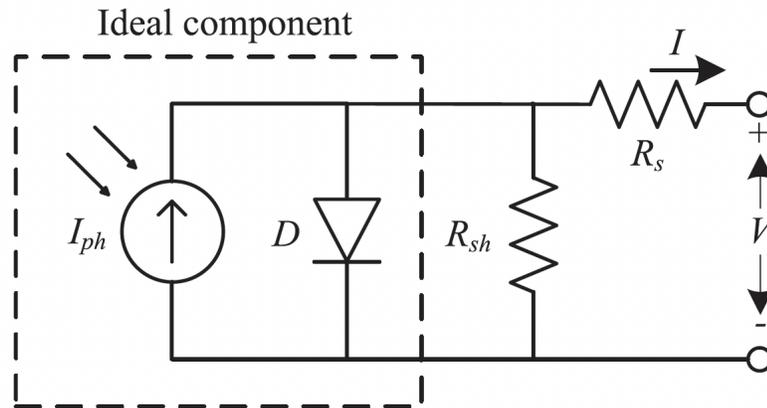


Figura 3.2: Circuito equivalente para el modelo simple de una celda fotovoltaica. [20]

El circuito equivalente mostrado en la Figura 3.2 está conformado por una fuente de corriente fotoeléctrica (I_{ph}) y un diodo (D), representando una celda fotovoltaica ideal, además se contiene una resistencia shunt (R_{sh}) y una resistencia serie (R_s) las cuales pueden ser omitidas para una mayor simpleza en el análisis de las celdas.

La ecuación que describe el modelo de la Figura 3.2 se muestra a continuación. [21][23]

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{V+IR_s}{aV_t}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (3.2)$$

Donde:

- I_{ph} es la corriente eléctrica generada por la radiación [A]
- I_0 es la corriente de saturación del diodo [A]
- a es el factor de idealidad del diodo (depende del material semiconductor)
- V_t es el voltaje térmico del diodo $V_t = \frac{kT}{q}$ [V]
- R_s es la resistencia serie [Ω]
- R_p es la resistencia shunt [Ω]
- k es la constante de Boltzmann (1.380×10^{-23} [$\frac{J}{K}$])
- T es la temperatura de la celda [K]
- q es la carga de del electrón (1.602×10^{-19} [C])

Los cinco parámetros que caracterizan a una celda fotovoltaica son la corriente de corto circuito (I_{SC}), el voltaje de circuito abierto (V_{OC}), la corriente en el punto de potencia máxima (I_{mpp}), el voltaje en el punto de potencia máxima (V_{mpp}) y el factor de relleno (FF) también llamado factor de forma. [11]

Las curvas (I-V y P-V) que incluyen los fabricantes en sus hojas de datos muestran gráficamente el comportamiento de una celda fotovoltaica y sus límites de operación ante diferentes condiciones. Ambas se muestran en la Figura 3.3

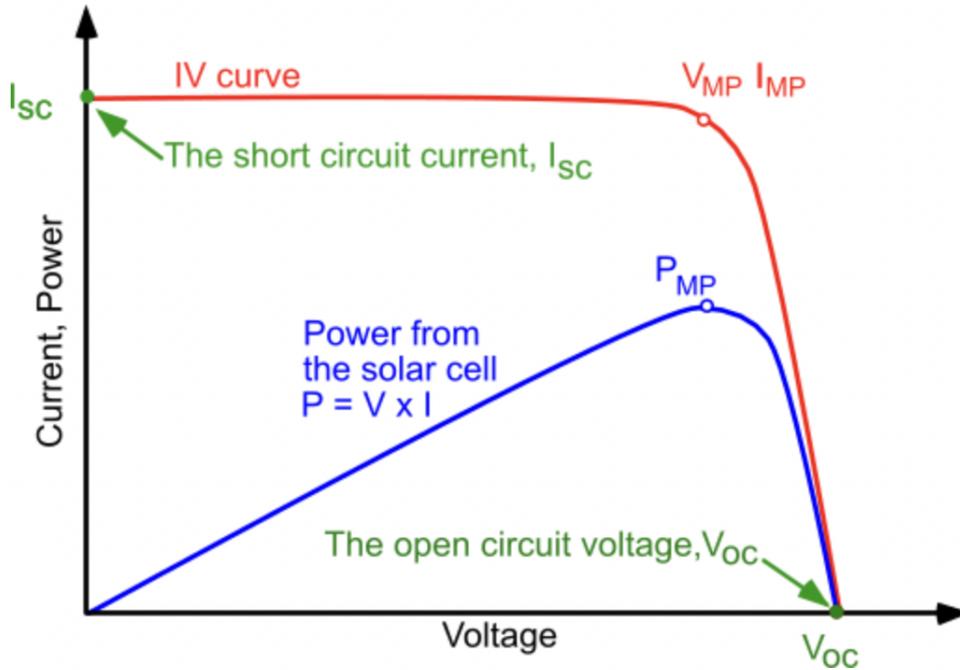


Figura 3.3: Curvas características de una celda fotovoltaica. [22]

Las condiciones estándares de prueba (Standard Test Conditions) son temperatura de $25^{\circ}[C]$, irradiancia de $1000 [\frac{W}{m^2}]$ y una masa de aire de 1.5 otorgan el comportamiento base de la celda, y este cambiara dependiendo de las condiciones, como se muestra a continuación.

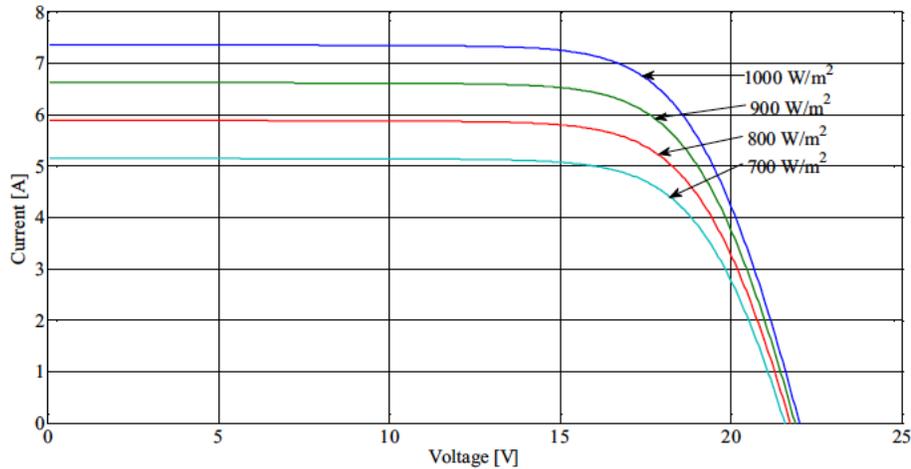
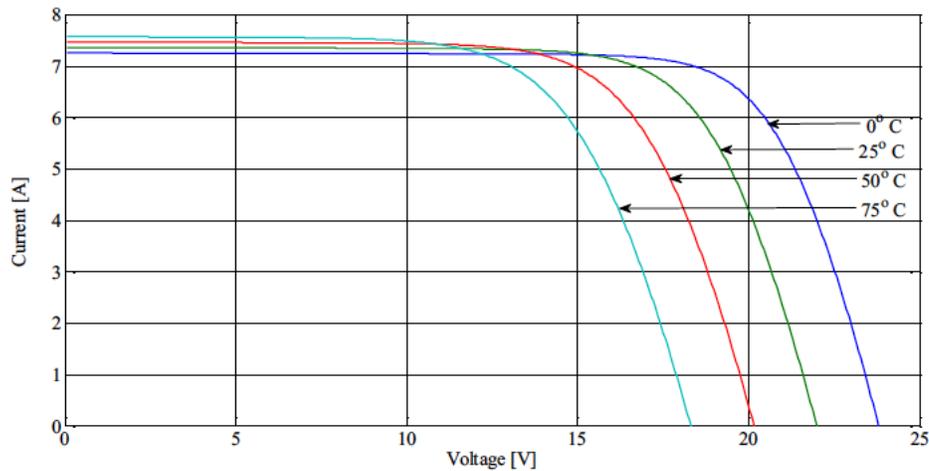
(a) Temperatura de 25°C e irradiancia variable.(b) Irradiancia de $1000 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2}\right]$ y temperatura variable.

Figura 3.4: Curva I-V típica de una celda ante cambios en las condiciones de prueba. [23]

En la Figura 3.4a se muestra el comportamiento de la corriente proporcionada por una celda cuando la temperatura es constante a distintos niveles de irradiancia mientras que en la Figura 3.4b se muestra el comportamiento del voltaje de una celda cuando la irradiancia es constante a diferentes niveles de temperatura. En relación con los cambios en la corriente y el voltaje se presentan cambios en la potencia ante distintos niveles de irradiancia temperatura como se muestra en las Figuras 3.5a y 3.5b.

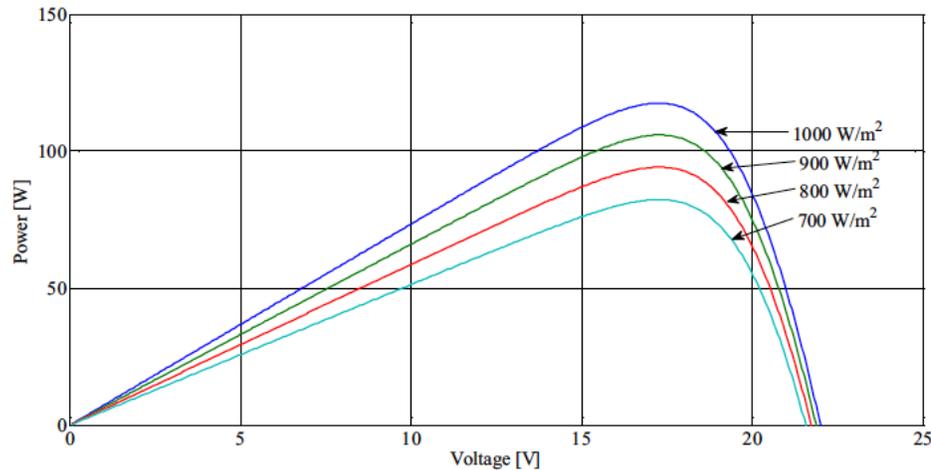
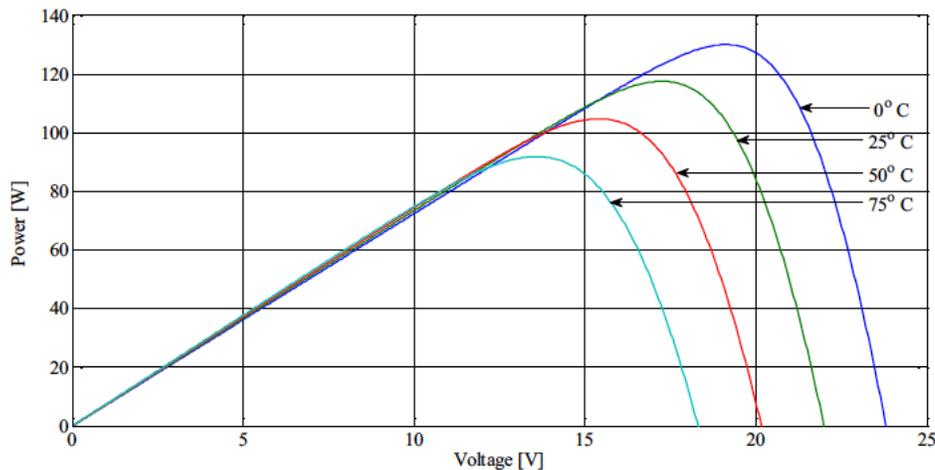
(a) Temperatura de 25°C e irradiancia variable.(b) Irradiancia de $1000 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2}\right]$ y temperatura variable.

Figura 3.5: Curva P-V típica de una celda ante cambios en las condiciones de prueba. [23]

3.1.3. Modelo de arreglo

La potencia que una celda fotovoltaica es capaz de generar es insuficiente para satisfacer los requerimientos de las cargas actuales. Por consiguiente se conforman módulos fotovoltaicos utilizando múltiples celdas fotovoltaicas en una conexión serie. A su vez las cadenas o strings están constituidos por módulos fotovoltaicos conectados en serie, y los arreglos o arrays se componen de cadenas o strings conectadas en paralelo.

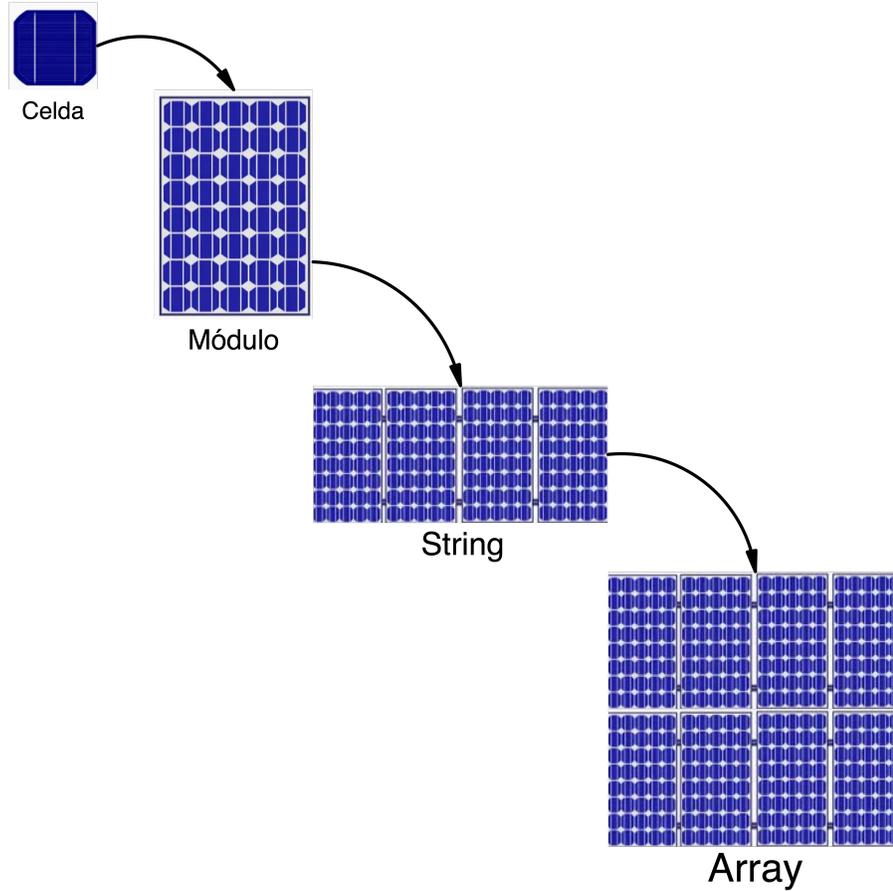


Figura 3.6: Composición de arreglos fotovoltaicos.

Para el análisis de los arrays es necesario utilizar un modelo que sea capaz de describir la interacción de todas las celdas que lo componen así como el comportamiento de todo el arreglo en conjunto. Al estar conformado por varios módulos fotovoltaicos en conexiones serie y paralelo la ecuación 3.3 debe ser modificada para representar el arreglo.

La ecuación resultante expuesta en [23] se muestra a continuación.

$$I_a = N_{pp}I_{pv} - N_{pp}I_0 \left(e^{\frac{V + IR_s \left(\frac{N_{ss}}{N_{pp}} \right)}{aV_t N_{ss}}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s \left(\frac{N_{ss}}{N_{pp}} \right)}{R_p \left(\frac{N_{ss}}{N_{pp}} \right)} \quad (3.3)$$

Donde:

- N_{pp} es el número de módulos conectados en paralelo.
- N_{ss} es el número de módulos conectados en serie.

3.2. Convertidor elevador DC/DC

3.2.1. Operación básica del convertidor boost

El convertidor elevador o convertidor *boost* es un convertidor conmutado que permite convertir el voltaje a la entrada a uno de mayor magnitud a la salida. Esta compuesto por elementos semiconductores y elementos encargados de almacenar energía, su circuito se muestra en la Figura 3.7.

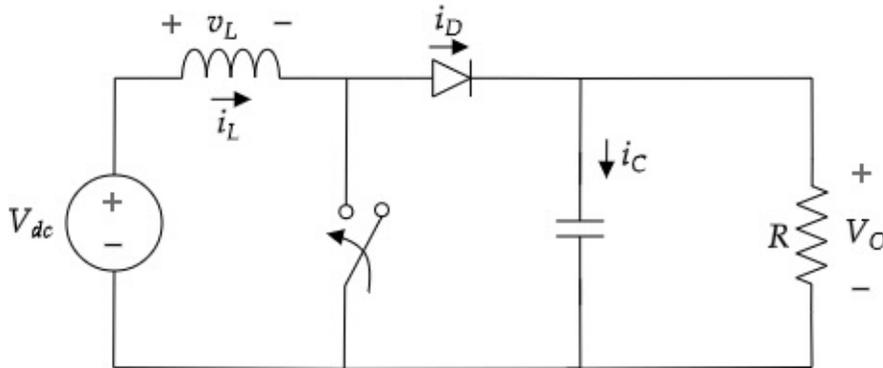
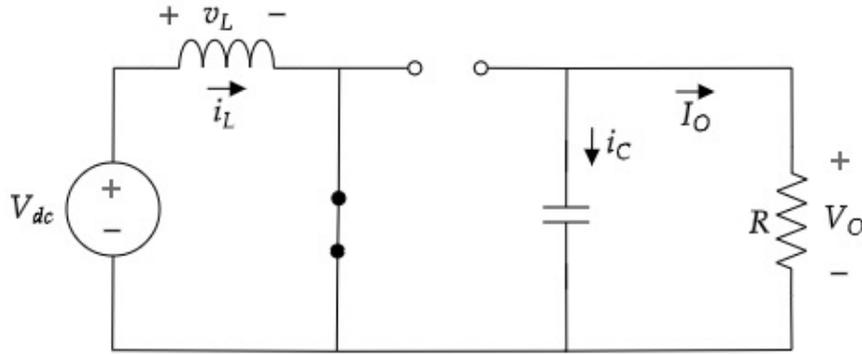


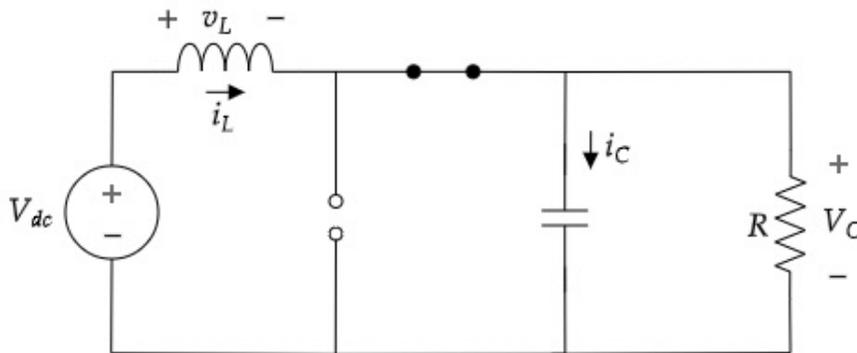
Figura 3.7: Circuito del convertidor boost.

Los elementos semiconductores que lo componen son: un transistor que cumple la función de interruptor de acuerdo con la señal de control y un diodo que impide la descarga del capacitor mientras que el inductor y el capacitor permiten el almacenamiento temporal de la energía.

El análisis de este convertidor se realiza considerando dos estados con el interruptor cerrado y abierto, los circuitos para cada estado se muestran en la Figura 3.8.



(a) Circuito boost con interruptor cerrado



(b) Circuito boost con interruptor abierto

Figura 3.8: Circuito del convertidor boost en distintos estados.

Analizando el circuito del convertidor boost con el interruptor cerrado que se muestra en la Figura 3.8a se obtienen las siguientes expresiones.

$$v_L = V_{dc} \quad (3.4)$$

$$i_c = -\frac{V_O}{R} \quad (3.5)$$

Realizando el mismo análisis para el circuito del convertidor boost con el interruptor abierto mostrado en la Figura 3.8b se obtienen las siguientes expresiones.

$$v_L = V_{dc} - V_O \quad (3.6)$$

$$i_c = i_L - \frac{V_O}{R} \quad (3.7)$$

El interruptor se considera cerrado en el tiempo DT y abierto en el tiempo restante $(1 - D)T$, por tanto las ecuaciones 3.4 y 3.6 se escriben.

$$v_L = V_{dc}DT \quad (3.8)$$

$$v_L = (V_{dc} - V_O)D'T \quad (3.9)$$

Debido que la variación de voltaje en el inductor para todo el periodo es cero.

$$V_{dc}DT + (V_{dc} - V_O)D'T = 0 \quad (3.10)$$

Al reescribir la ecuación 3.10

$$V_O = \frac{V_{dc}}{(1 - D)} = \frac{V_{dc}}{D'} \quad (3.11)$$

$$I_O = \frac{V_O}{R} = \frac{V_{dc}}{R(1 - D)} \quad (3.12)$$

Las ecuaciones 3.11 y 3.12 describen el comportamiento del voltaje y la corriente a la salida del convertidor boost en función del voltaje de entrada y el ciclo de trabajo.

3.2.2. Seguimiento del Punto de Máxima Potencia

El seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT, por sus siglas en ingles) es una parte imprescindible de los sistemas fotovoltaicos y tiene como finalidad determinar automáticamente el voltaje V_{MPP} y/o corriente I_{MPP} con el que el arreglos fotovoltaicos deben operar para obtener la máxima potencia de salida P_{MPP} bajo las condiciones de irradiancia y temperatura dadas. [28]

En la Figura 3.6 se muestra gráficamente el punto de máxima potencia en las curvas características de las celdas fotovoltaicas.

Existen al menos 19 métodos distintos para poder hacer el seguimiento del punto de máxima potencia de un sistema fotovoltaico [29]. En la Figura 3.9 se resumen las diferencias entre cada uno de estos entre las que se encuentra en la complejidad, velocidad de convergencia, número de sensores, costo, rango de efectividad, elementos de hardware necesarios para su implementación, entre otros. La mayoría de los métodos son capaces de responder a los cambios en los sistemas producto del envejecimiento de los mismos, por el contrario aquellos que funcionan con lazos de control abierto requieren sintonización periódica.

MPPT Technique	PV Array Dependent?	True MPPT?	Analog or Digital?	Periodic Tuning?	Convergence Speed	Implementation Complexity	Sensed Parameters
Hill-climbing/P&O	No	Yes	Both	No	Varies	Low	Voltage, Current
IncCond	No	Yes	Digital	No	Varies	Medium	Voltage, Current
Fractional V_{OC}	Yes	No	Both	Yes	Medium	Low	Voltage
Fractional I_{SC}	Yes	No	Both	Yes	Medium	Medium	Current
Fuzzy Logic Control	Yes	Yes	Digital	Yes	Fast	High	Varies
Neural Network	Yes	Yes	Digital	Yes	Fast	High	Varies
RCC	No	Yes	Analog	No	Fast	Low	Voltage, Current
Current Sweep	Yes	Yes	Digital	Yes	Slow	High	Voltage, Current
DC Link Capacitor Droop Control	No	No	Both	No	Medium	Low	Voltage
Load I or V Maximization	No	No	Analog	No	Fast	Low	Voltage, Current
dP/dV or dP/dI Feedback Control	No	Yes	Digital	No	Fast	Medium	Voltage, Current
Array Reconfiguration	Yes	No	Digital	Yes	Slow	High	Voltage, Current
Linear Current Control	Yes	No	Digital	Yes	Fast	Medium	Irradiance
I_{MPP} & V_{MPP} Computation	Yes	Yes	Digital	Yes	N/A	Medium	Irradiance, Temperature
State-based MPPT	Yes	Yes	Both	Yes	Fast	High	Voltage, Current
OCC MPPT	Yes	No	Both	Yes	Fast	Medium	Current
BFV	Yes	No	Both	Yes	N/A	Low	None
LRCM	Yes	No	Digital	No	N/A	High	Voltage, Current
Slide Control	No	Yes	Digital	No	Fast	Medium	Voltage, Current

Figura 3.9: Características principales de los métodos MPPT. [28]

El algoritmo o método de perturbación y observación (P&O) es ampliamente utilizado debido a la baja complejidad de implementación y simplicidad en su funcionamiento, de manera general este consiste en modificar el ciclo de trabajo de un convertidor electrónico de potencia conectado a la salida del arreglo fotovoltaico, el cambio en el ciclo de trabajo modifica la corriente extraída del arreglo fotovoltaico. [29]

El criterio con el que se realizan las modificaciones al ciclo de trabajo es el siguiente: Si al medir el voltaje del arreglo V_{pv} y calcular la potencia esta aumenta con respecto a la repetición anterior el punto de operación se encuentra más cerca del MPP y el cambio en el ciclo de trabajo debe ser en la misma dirección. En caso contrario si la potencia respecto a la medición anterior disminuye el cambio deberá ser en dirección opuesta. El diagrama de flujo de este algoritmo se muestra en la Figura 3.10.

La implementación del algoritmo P&O se puede realizar de forma análoga o digital, esta última permite realizar modificaciones sin cambios en los componentes. Otro aspecto a considerar es la baja capacidad de respuesta ante cambios atmosféricos repentinos (irradiancia y temperatura).

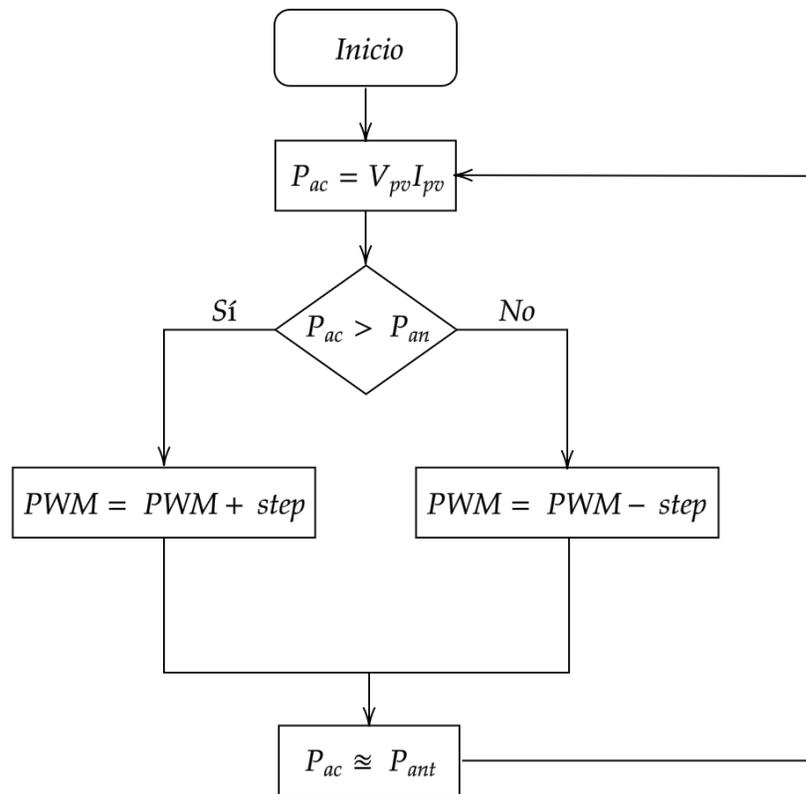


Figura 3.10: Diagrama de flujo del algoritmo P&O. [29]

3.2.3. Control en lazo cerrado

El control automático es una herramienta que permite regular el comportamiento de cualquier sistema o planta para mantenerlo en un punto de operación que se requiera aun con la presencia de perturbaciones externas. El mantener una operación óptima de los sistemas permite mejorar la calidad, obtener mayores beneficios económicos y minimizar la ocurrencia de errores en tareas complejas.

Como se menciona en [26, pag. 216] el 95% de los lazos de control existentes son de tipo PID. Desde la aparición de los procesos de control en 1940 los controladores PID se convirtieron en un estándar para la industria, sin embargo en la actualidad los controladores PID se desarrollan en microprocesadores y son utilizados en conjunto con funciones lógicas secuenciales, selectores y otras funciones básicas con el propósito de formar sistemas de automatización robustos que puedan ser utilizados en las industrias de generación de energía eléctrica, manufactura, transporte, entre otras.

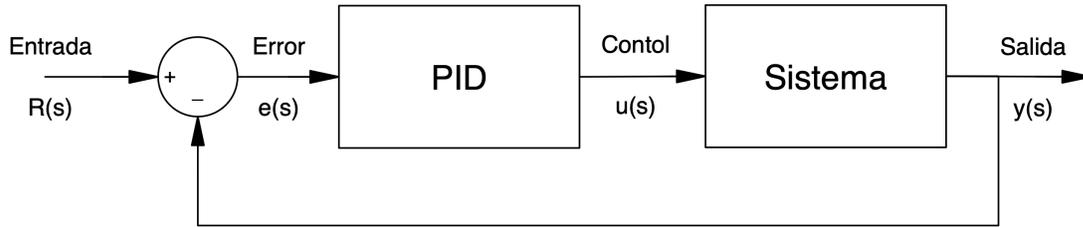


Figura 3.11: Diagrama de bloques de un lazo de control PID de una entrada y una salida.

Los controladores tipo PID más comunes son: [27]

- Controlador Proporcional (P)

La salida que se obtiene del bloque de control es proporcional al error y su función de transferencia se presenta en la ecuación 3.13. El controlador proporcional tiene muchas limitaciones y error en régimen permanente

$$C_P(s) = K_P \quad (3.13)$$

Por lo tanto, la señal de control a la entrada del sistema siendo K_P una ganancia ajustable

$$u(t) = e(t)K_P \quad (3.14)$$

- Controlador Integral (I)

Para este tipo de controlador el valor de la señal de control es proporcional a la integral de la señal de error, es decir.

$$u(t) = K_i \int_0^t e(t)dt \quad (3.15)$$

El controlador integral tiene un tiempo de respuesta alto y un nulo error en régimen permanente.

- Controlador Proporcional-Integral (PI)

La respuesta de un controlador PI es la suma de las acciones de los dos controladores descritos anteriormente con un tiempo de respuesta inmediato por la acción proporcional y un nulo error en régimen permanente, la señal de control es la siguiente.

$$u(t) = K_P \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt \right) \quad (3.16)$$

El controlador proporcional-integral es adecuado para sistemas o procesos con comportamiento de primer orden.

3.3. Inversor VSC: Modelado y control

3.3.1. Inversor VSC trifásico

El convertidor de fuente de voltaje también llamado VSC (Voltage Source Converter) permite convertir la energía en DC suministrada por el arreglo fotovoltaico a AC para ser utilizado por cargas o transporte a los centros de consumo.

El inversor VSC trifásico de dos niveles, mostrado en la Figura 3.12, está conformado por tres convertidores de medio puente, uno por cada fase del sistema de AC mientras que las terminales de CD están conectadas una fuente de CD.

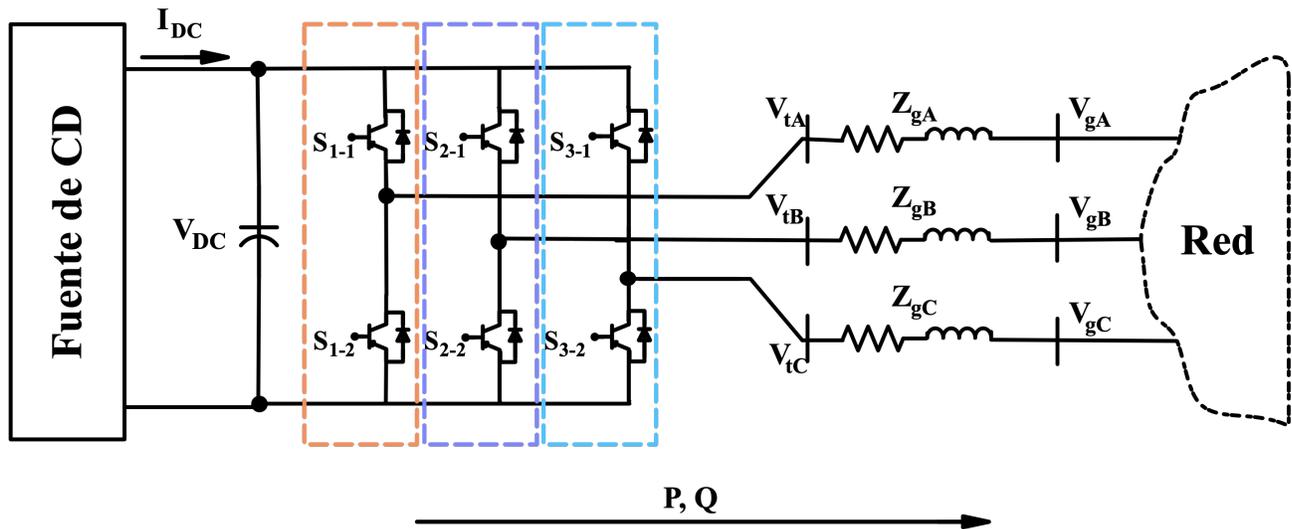


Figura 3.12: Inversor VSC trifásico de dos pulsos.

La tensión de salida es controlada por la conmutación de los interruptores de cada fase a una frecuencia determinada. Esta conmutación se realiza con una técnica PWM, con frecuencias típicamente altas [kHz], que permite una forma de onda aproximadamente senoidal con armónicos mínimos y fáciles de filtrar.

En la Figura 3.12 se muestra un Inversor VSC trifásico conectado a la red a través de un rectificador RL en donde la potencia fluye de la fuente de DC a la red. A continuación se muestra el modelado de un inversor VSC trifásico sin sensor de corriente propuesto por [30].

Los voltajes y corrientes en el lado de AC están descritos por:

$$\vec{V}_g^{abc} = |V_g| \angle \theta_g^{abc} \quad (3.17)$$

$$\vec{I}_g^{abc} = |I_g| \angle \theta_g^{abc} \quad (3.18)$$

El voltaje en las terminales de AC del Inversor VSC

$$\vec{V}_t^{abc}(t) = \frac{1}{2} \cdot \vec{m}^{abc}(t) \cdot V_{DC}(t) \quad (3.19)$$

$$\vec{V}_t^{abc} = |V_t| \angle \theta_t^{abc} \quad (3.20)$$

Y el voltaje en el rectificador

$$|\vec{V}_Z^{abc}| \angle \theta_Z^{abc} = |\vec{V}_g^{abc}| \angle \theta_g^{abc} - |\vec{V}_t^{abc}| \angle \theta_t^{abc} \quad (3.21)$$

La Ecuación 3.18 se expresa como:

$$|\vec{I}_g^{abc}| \angle \theta_g^{abc} = \frac{|\vec{V}_Z^{abc}| \angle \theta_Z^{abc}}{\sqrt{X_g^2 - R_g^2} \angle \tan^{-1} \left(\frac{X_g}{R_g} \right)} \quad (3.22)$$

Se desarrolla el numerador sustituyendo la ecuación 3.21 en 3.22

$$|\vec{I}_g^{abc}| \angle \theta_g^{abc} = \frac{|\vec{V}_g^{abc}| \angle \theta_g^{abc} - |\vec{V}_t^{abc}| \angle \theta_t^{abc}}{\sqrt{X_g^2 - R_g^2} \angle \tan^{-1} \left(\frac{X_g}{R_g} \right)} \quad (3.23)$$

Sustituyendo la ecuación 3.19 en 3.23

$$|\vec{I}_g^{abc}| \angle \theta_g^{abc} = \frac{|\vec{V}_g^{abc}| \angle \theta_g^{abc} - \frac{V_{DC}}{2} \cdot \vec{m}_t^{abc}}{\sqrt{X_g^2 - R_g^2} \angle \tan^{-1} \left(\frac{X_g}{R_g} \right)} \quad (3.24)$$

Resolviendo para \vec{m}_t^{abc} que es el índice de modulación requerido para mantener el correcto funcionamiento del inversor VSC.

$$|\vec{m}| \angle \theta_t^{abc} = -2 \frac{-|\vec{V}_g| \angle \theta_g^{abc} - |\vec{V}_Z| \angle \left(\angle \theta_Z^{abc} + \tan^{-1} \left(\frac{X_g}{R_g} \right) \right)}{V_{DC}} \quad (3.25)$$

3.3.2. Esquema de control de interconexión

Para poder generar un esquema de control de interconexión es necesario un modelo de la planta (VSC) en el dominio de la frecuencia, el cual se presenta a continuación. [30]

Para el lado de DC.

$$V_{DC}(s) = \frac{I_{DC}(s)}{\frac{1}{2}sC + \frac{1}{R_L}} \quad (3.26)$$

En donde R_L es la resistencia equivalente a la carga.

Para el lado de AC.

$$\vec{I}_L^{abc}(s) = \frac{\vec{V}_g^{abc}(s) - \frac{1}{2}\vec{m}^{abc}(s) \cdot V_{DC}(s)}{sL + R_g} \quad (3.27)$$

Aplicando la Ecuación 3.25 y asumiendo que $|\vec{V}_Z| \approx V'_z$ debido a que la potencia activa depende exclusivamente de los incrementos de $|\vec{V}_Z|$ obtenemos los valores necesarios del índice de modulación en lazo cerrado que dependen únicamente de voltajes en AC y DC.

$$V'_z = (V_{DCref} - V_{DC}) \left[K_p \frac{\left(s + \frac{K_i}{K_p} \right)}{s} \right] \quad (3.28)$$

$$|\vec{m}(s)| \approx -2 \frac{-|\vec{V}_g(s)| - (V_{DCref} - V_{DC}) \left[K_p \frac{\left(s + \frac{K_i}{K_p} \right)}{s} \right] \sin(\theta_L^{abc}) + \tan^{-1} \left(\frac{X_g}{R_g} \right)}{V_{DCref}} \quad (3.29)$$

A través de este método propuesto en [30] es posible tener un algoritmo para control de interconexión en el que es posible regular el voltaje en las terminales del VSC y la dirección de la potencia manteniendo un factor de potencia unitario realimentando al controlador con dos variables V_{DC} y V_g^{abc} eludiendo el uso de sensores de corriente y las complicaciones que traen consigo. En la Figura 3.13 se observa un esquema que describe el concepto de funcionamiento del sistema fotovoltaico con el control de interconexión propuesto.

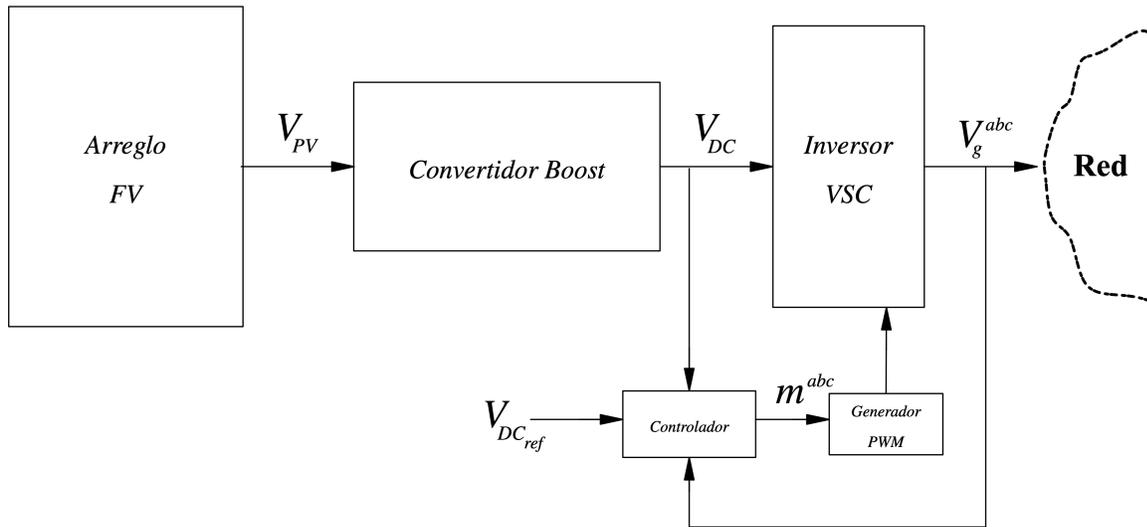


Figura 3.13: Diagrama de bloques del sistema con controlador de interconexión.

3.4. Simulación de sistemas fotovoltaicos

El funcionamiento de los sistemas puede ser emulado realizando simulaciones que permitan efectuar estudios como el que se propone en este trabajo de investigación. La simulación de los sistemas fotovoltaicos nos permite tener una visión precisa del funcionamiento de los componentes y la interacción en conjunto de estos sin utilizar equipos de alto valor y evitando riesgos.

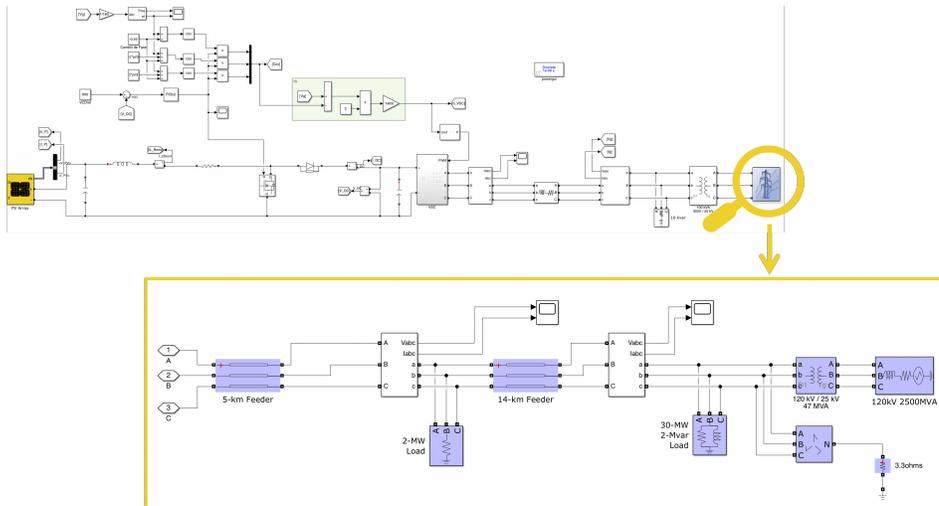


Figura 3.14: Modelo de sistema fotovoltaico.

En la Figura 3.14 se muestra el modelo realizado en Matlab Simulink para esta inves-

tigación.

A continuación se muestran las gráficas que demuestran el funcionamiento adecuado del modelo propuesto para esta investigación.

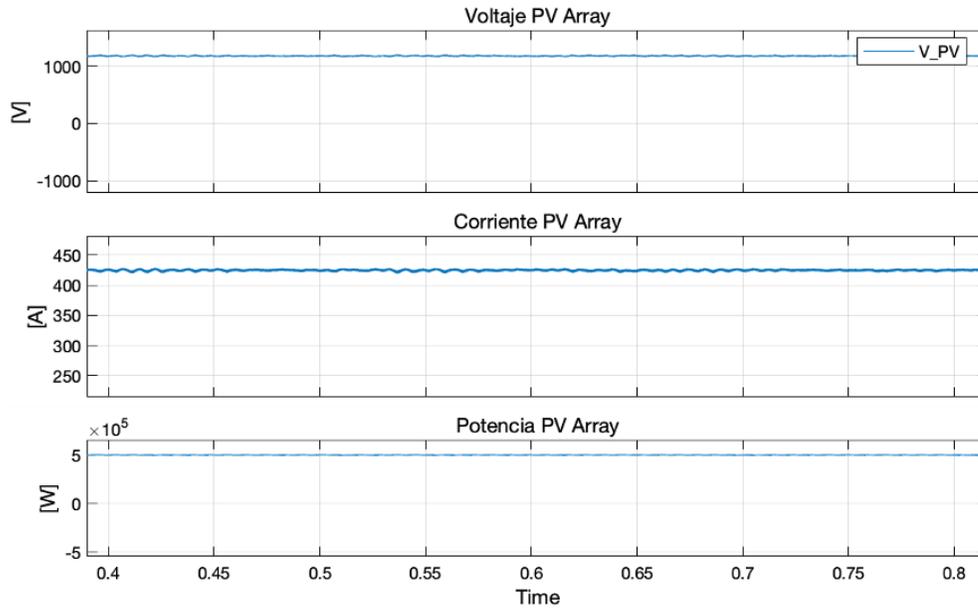


Figura 3.15: Voltaje, corriente y potencia del arreglo fotovoltaico.

En la Figura 3.15 se muestra el voltaje y la corriente a la salida, así como la potencia entregada por el arreglo fotovoltaico. Mientras que en la Figura 3.16 se observan los voltajes a la entrada y salida del convertidor boost, además de la corriente de salida del mismo.

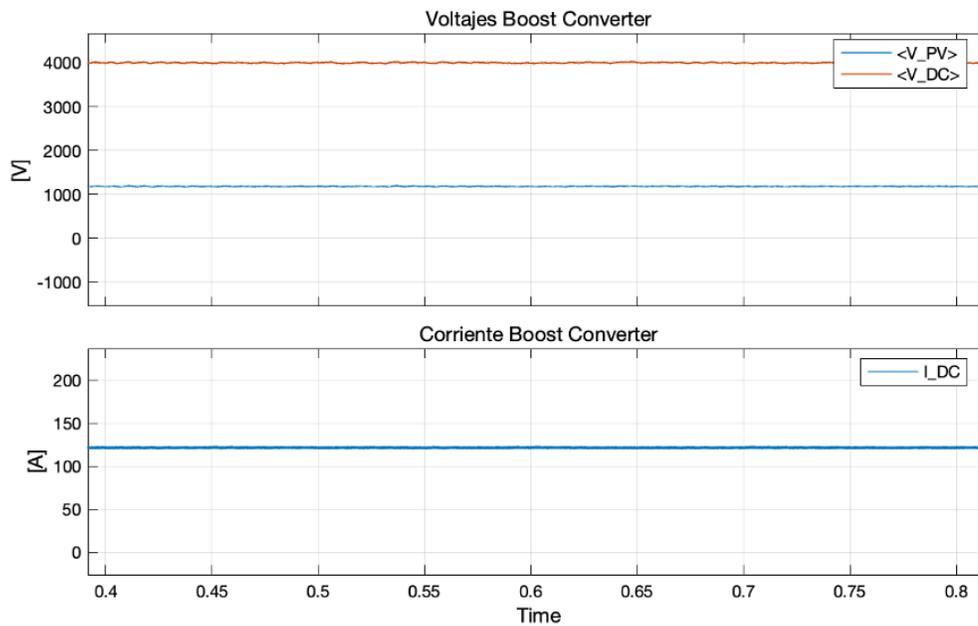


Figura 3.16: Voltajes y corriente del convertidor boost.

Al mismo tiempo la Figura 3.17 muestra el intercambio de potencias activa y reactiva en el punto de interconexión, manteniendo el fp aproximadamente igual a 1.

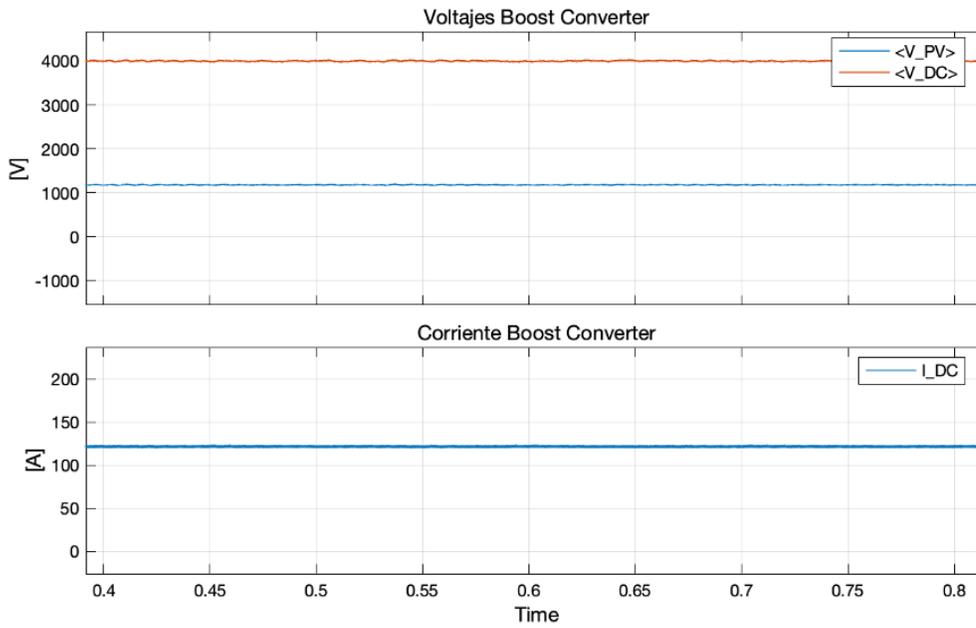


Figura 3.17: Potencia activa y reactiva del sistema fotovoltaico.

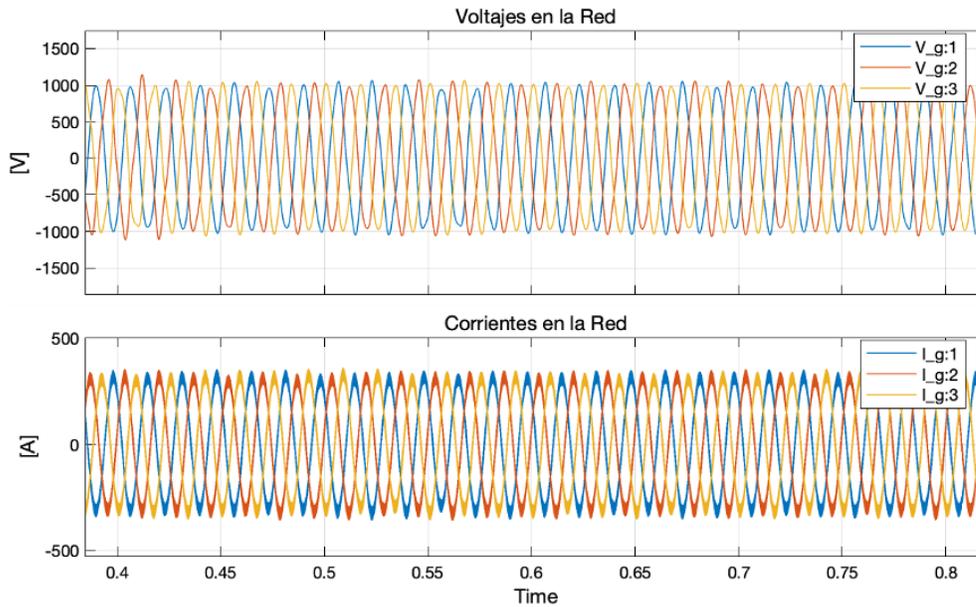


Figura 3.18: Voltajes y corrientes en el punto de interconexión.

Por otra parte la Figura 3.18 muestra los voltajes y corrientes del sistema en el punto de interconexión.

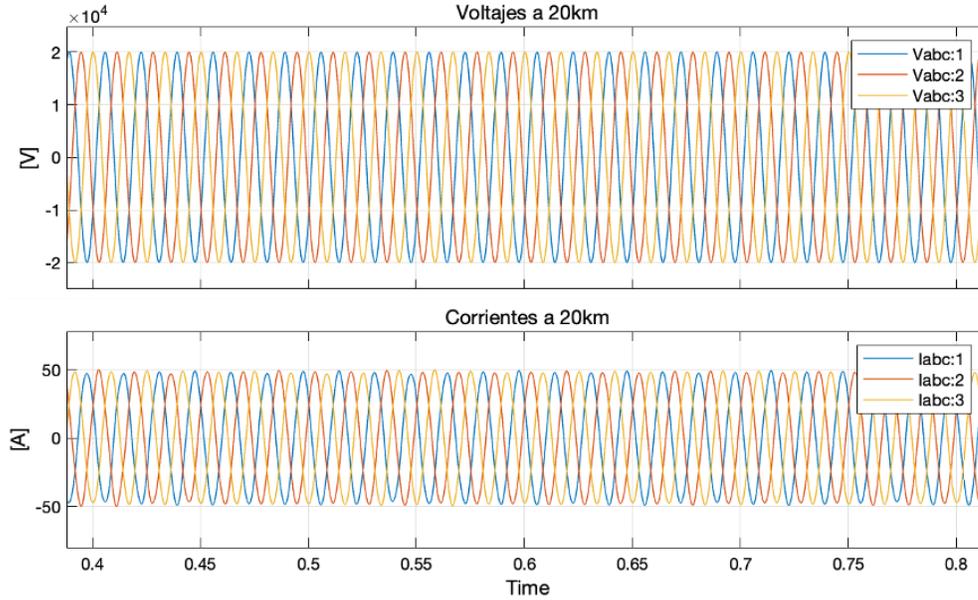


Figura 3.19: Voltajes y corrientes en la red de distribución.

Por ultimo en la Figura 3.19 muestra los voltajes y corrientes entro de la red de distribución, en el final de un alimentador de $20[km]$.

3.5. Conclusiones particulares

En este apartado se describe el funcionamiento básico de los elementos que componen un sistema fotovoltaico interconectado. Las ecuaciones y modelos que nos permiten entender los comportamientos individuales y en conjunto de cada elemento que compone el sistema: arreglo fotovoltaico, convertidor elevador de corriente directa, fuente convertidora o inversor junto con los algoritmos de control que permiten extraer la potencia máxima del sistema.

Capítulo 4

Propuesta: Análisis de propagación de perturbaciones

En este capítulo se muestra el comportamiento de los tres sistemas fotovoltaicos realizados durante esta investigación, todas las fallas se aplican cuando el sistema comienza a operar en estado estable (0.5[s]) y se mantienen hasta el final de la simulación (1[s]).

Se reportan los efectos observados para cada caso en las cuatro partes principales del sistema: arreglo fotovoltaico, convertidor boost, VSC y la red de distribución.

4.1. Convertidor elevador DC/DC

4.1.1. Corto circuito

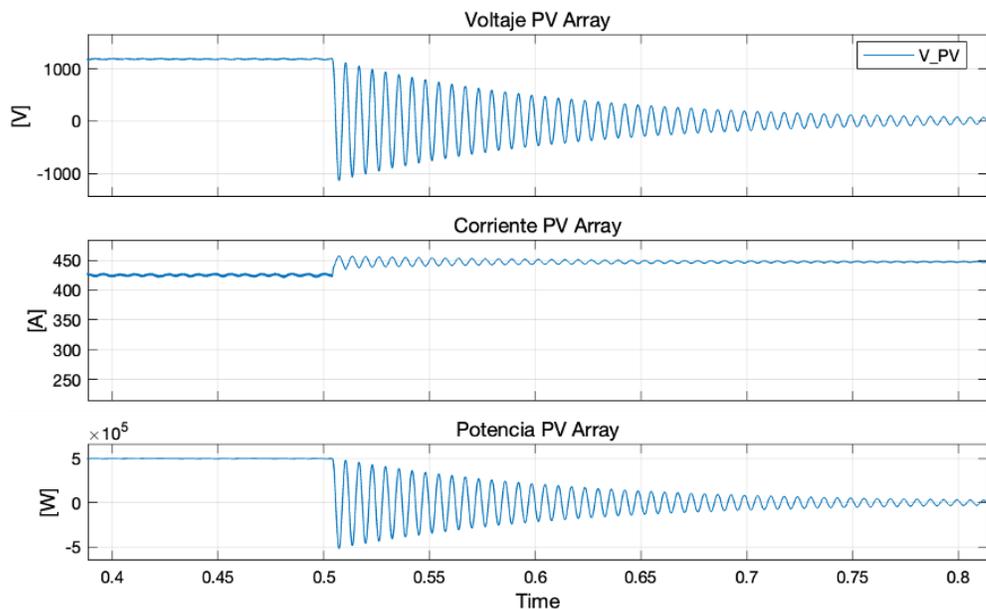


Figura 4.1: Voltaje, corriente y potencia del arreglo fotovoltaico.

En la Figura 4.1 se aprecia la caída gradual del voltaje en terminales del arreglo mientras que la corriente de salida tiene un incremento de aproximadamente 20 [A], ocasionando que la potencia caiga en paralelo con el voltaje.

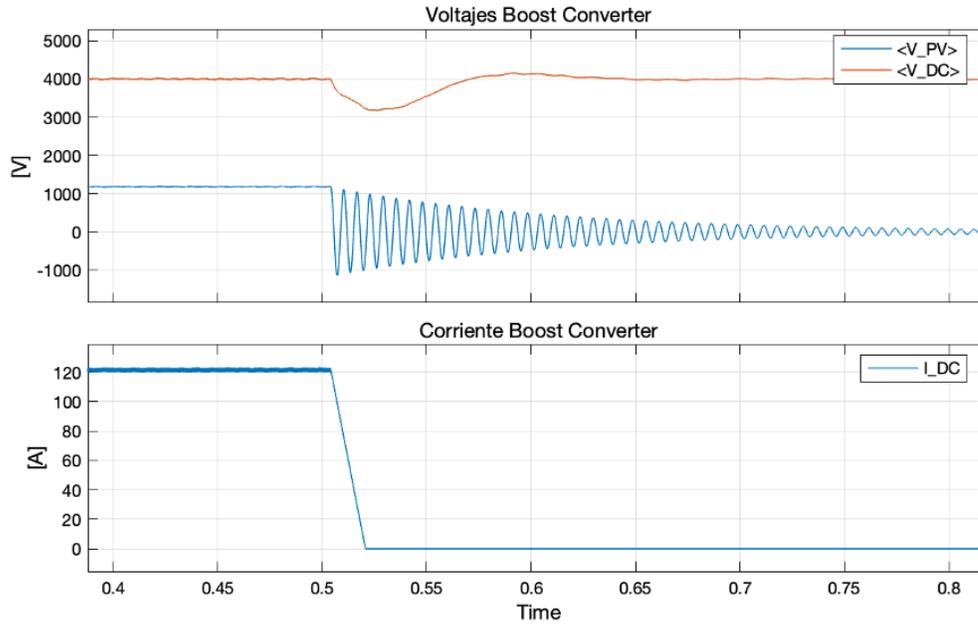


Figura 4.2: Voltajes y corriente en el convertidor boost.

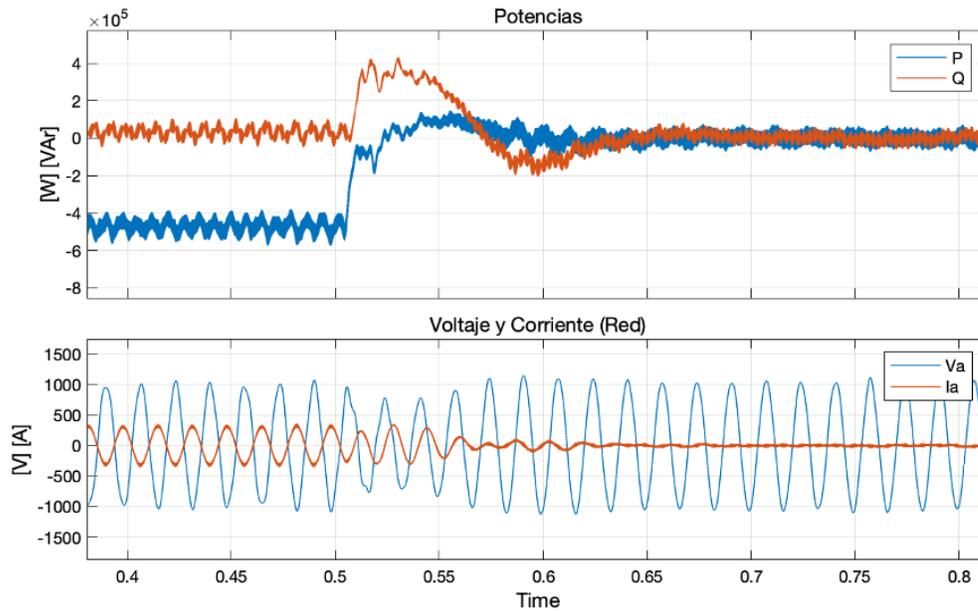


Figura 4.3: Potencia activa y reactiva del sistema fotovoltaico.

Durante la falla el intercambio de potencia entre el sistema y la red eléctrica se hace nulo, como se muestra en la Figura 4.3. Otro efecto que es importante resaltar es la

disminución de magnitud en los voltajes y corrientes trifásicos en el punto de interconexión, efectos expuestos en la Figura 4.4.

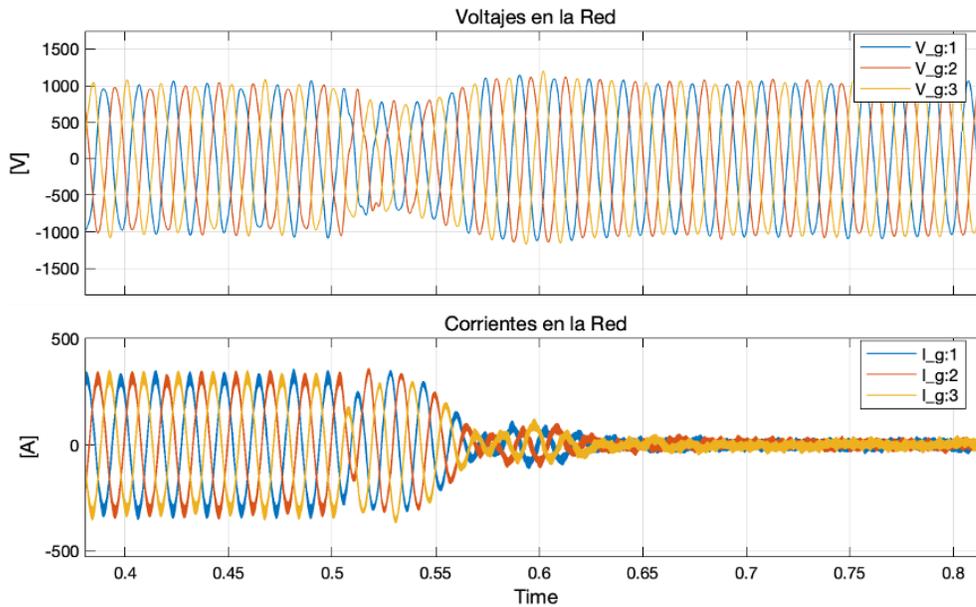


Figura 4.4: Voltajes y corrientes en el punto de interconexión.

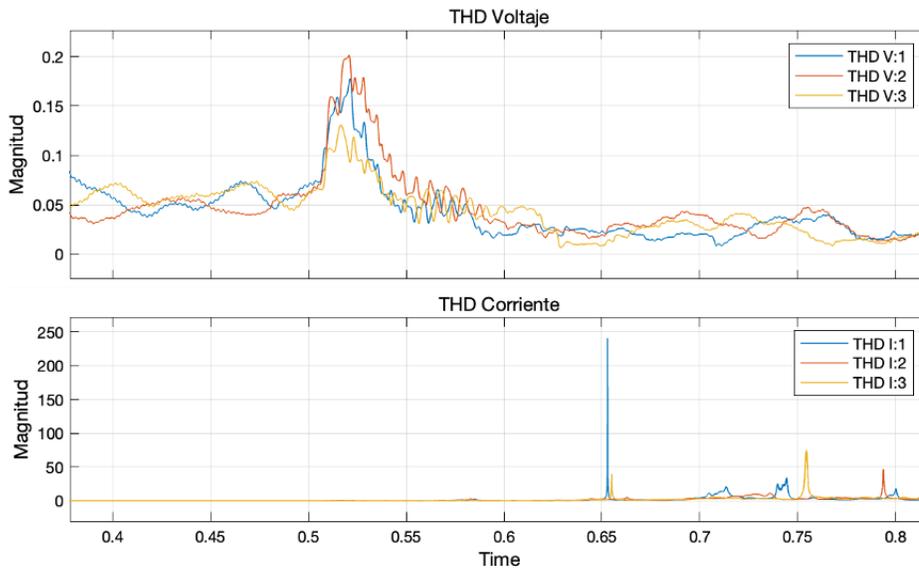


Figura 4.5: Distorsión armónica total en el punto de interconexión.

La distorsión armónica, mostrada en la Figura 4.5, en el punto de interconexión muestra un aumento casi nulo, aproximadamente 0.15 por fase para el voltaje mientras que el de la corriente no presenta efectos al momento de la falla.

Dentro de la red de distribución después de un alimentador de 20 km de longitud se observa un incremento en la corriente de las tres fases.

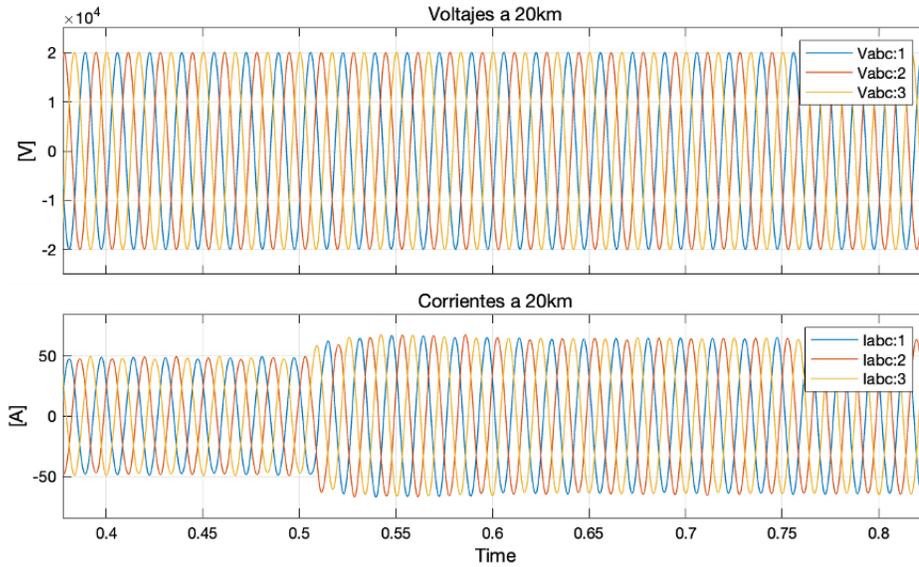


Figura 4.6: Voltajes y corrientes en la red de distribución.

4.1.2. Circuito abierto

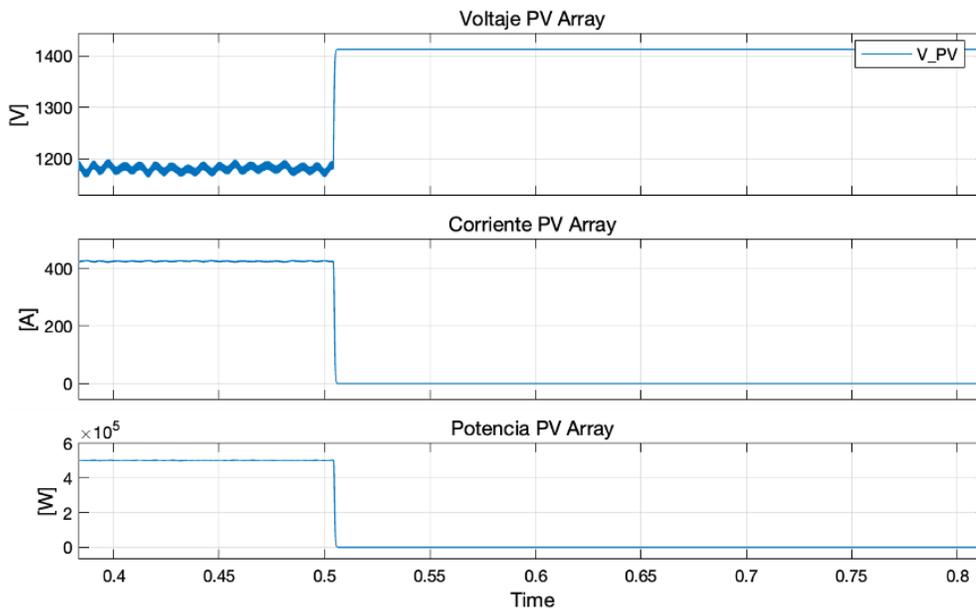


Figura 4.7: Voltaje, corriente y potencia del arreglo fotovoltaico.

Las variables del arreglo fotovoltaico mostradas en la Figura anterior presentan un incremento de 200 [V] y una caída rápida de la corriente llegando a 0 [A] en menos de 0.05 [s] provocando un efecto paralelo en la potencia entregada.

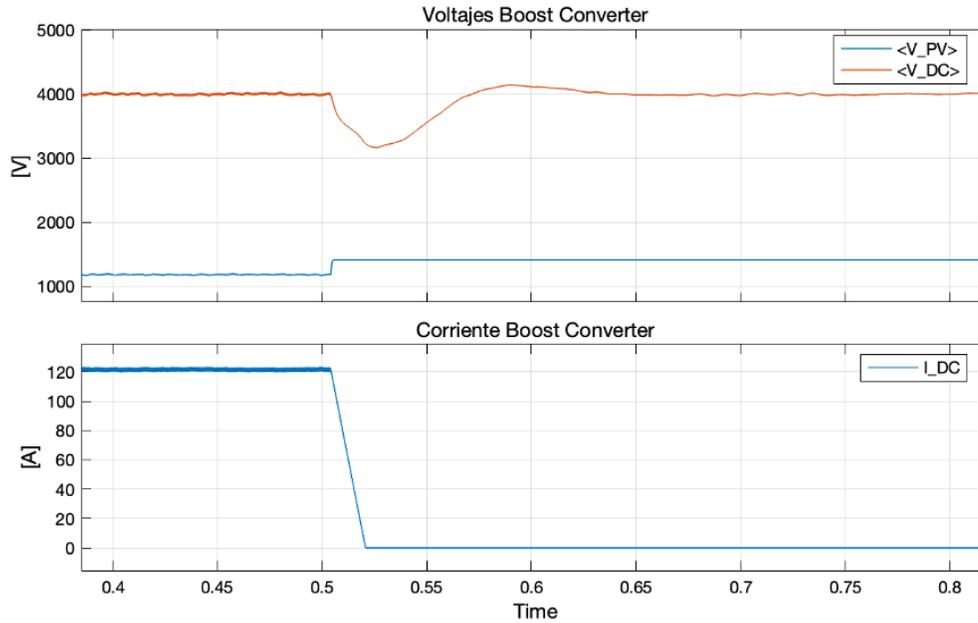


Figura 4.8: Voltajes y corriente en el convertidor boost.

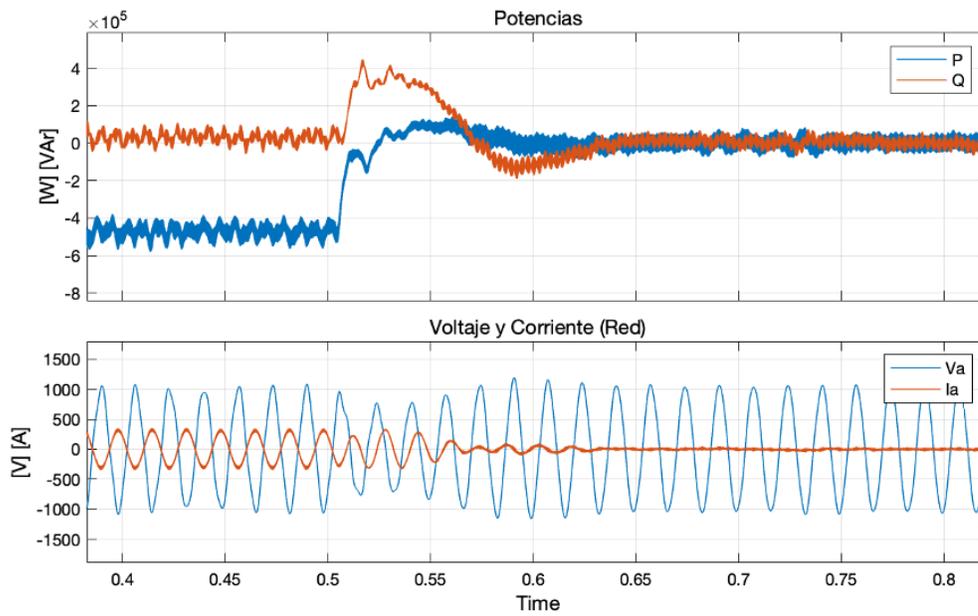


Figura 4.9: Potencia activa y reactiva del sistema fotovoltaico.

En la Figura 4.8 se observa el aumento en el voltaje de entrada del convertidor y la caída repentina de la corriente provocada por la falla en el interruptor.

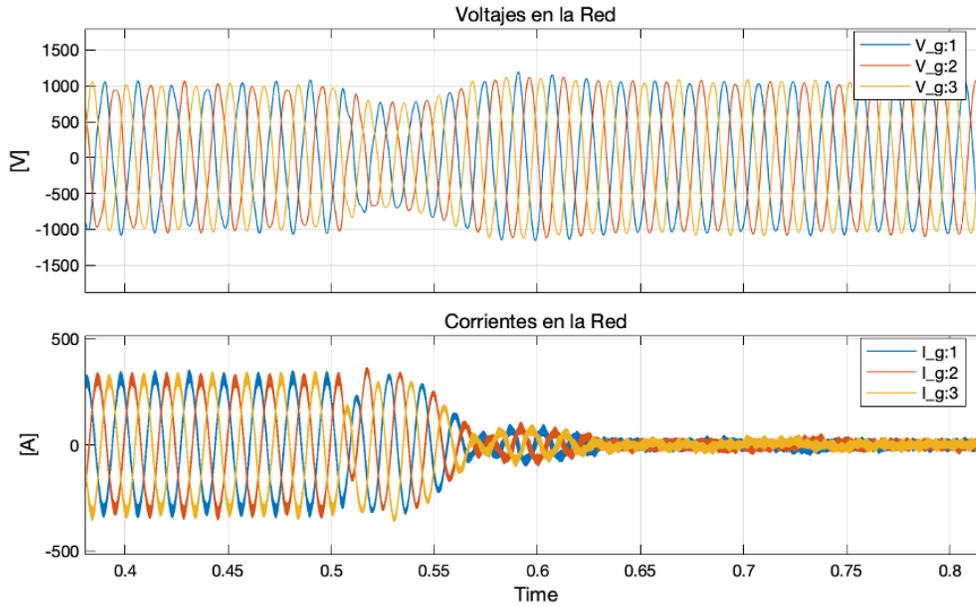


Figura 4.10: Voltajes y corrientes en el punto de interconexión.

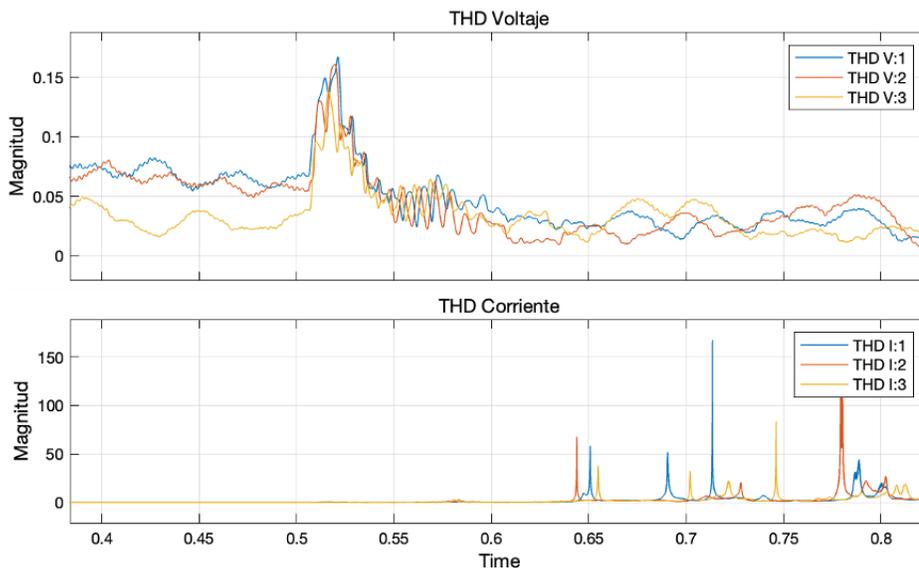


Figura 4.11: Distorsión armónica total en el punto de interconexión.

Al observar las Figuras 4.9 a 4.12 podemos notar que los efectos después del convertidor elevador son exactamente los mismos que los que se presentan en la falla de corto circuito.

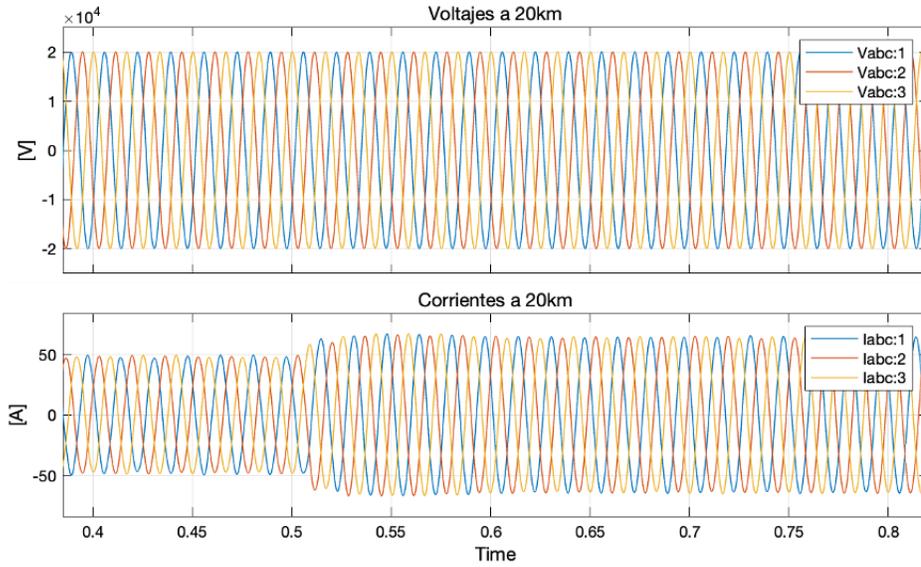


Figura 4.12: Voltajes y corrientes en la red de distribución.

4.2. VSC

4.2.1. Corto circuito

A continuación se muestra el comportamiento del sistema fotovoltaico con $500[kW]$ de potencia nominal cuando en el VSC ocurre un corto circuito en un interruptor de una fase.

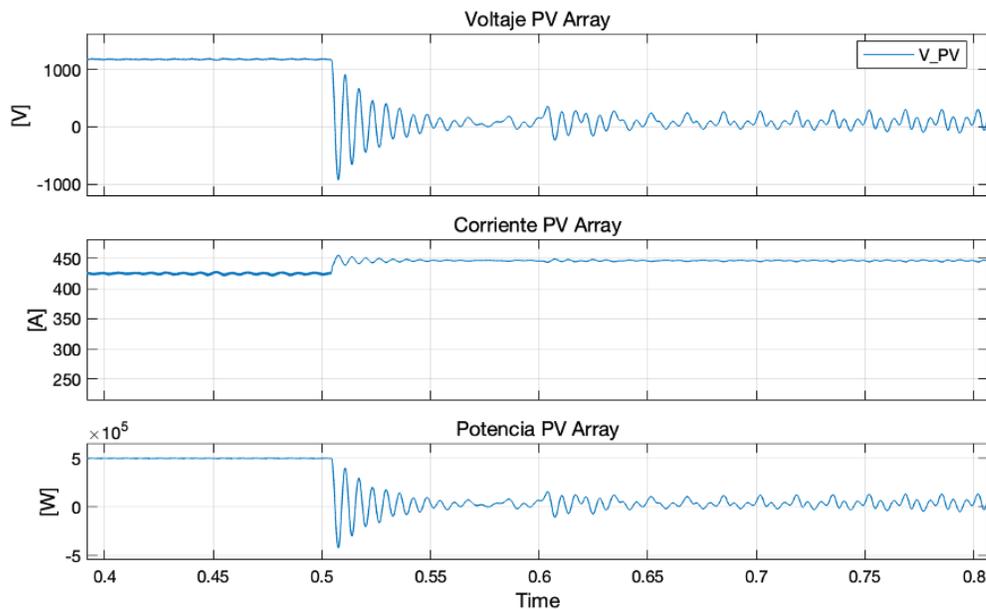


Figura 4.13: Voltaje, corriente y potencia del arreglo fotovoltaico.

En la Figura 4.13 es posible notar la caída repentina del voltaje en el voltaje del arreglo

fotovoltaico a 0 [V] y un aumento de 20 [A] en la corriente, estos efectos provocan que la potencia a la salida del arreglo sea nula. Mientras que el convertidor boost experimenta un efecto similar, el cual se muestra en la Figura 4.14, debido a que el voltaje a la entrada es cero no existe un efecto de aumento en el voltaje provocando un aumento en la corriente a la salida del mismo.

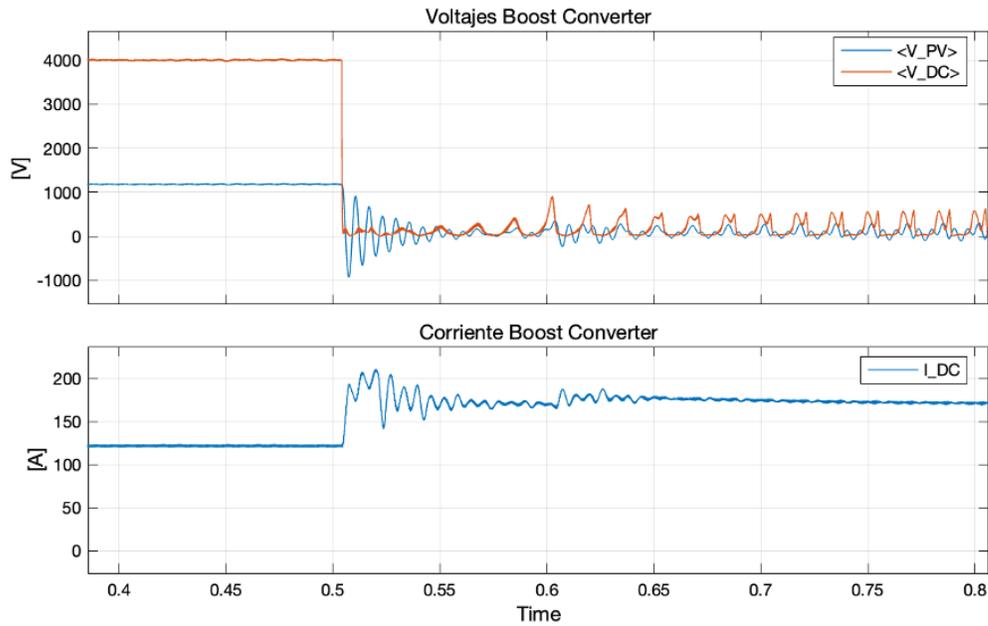


Figura 4.14: Voltajes y corriente en el convertidor boost.

Durante la falla la inyección de potencia activa hacia el sistema es nula y la potencia reactiva tiene un cambio de dirección, es decir el VSC consume potencia reactiva durante la falla. Este efecto se presenta en la Figura 4.15.

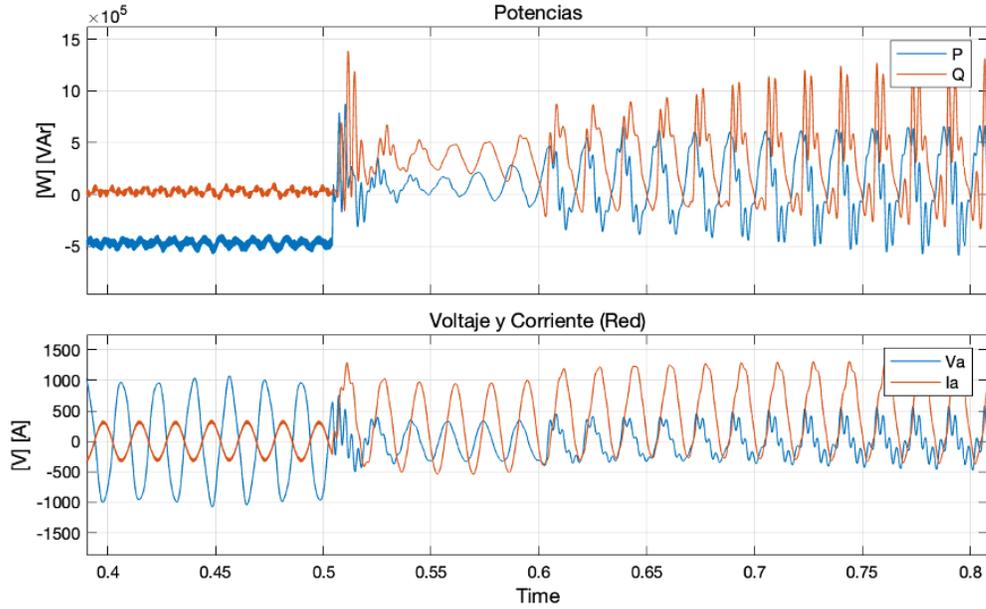


Figura 4.15: Potencia activa y reactiva del sistema fotovoltaico.

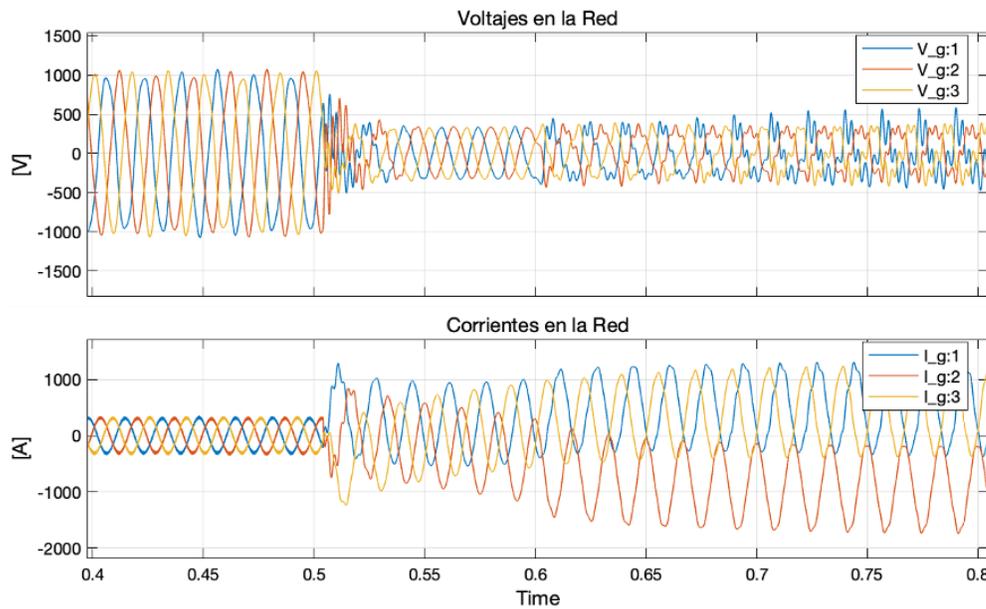


Figura 4.16: Voltajes y corrientes en el punto de interconexión.

Por otro lado se muestran en la Figura 4.16 los efectos comunes de una falla de corto circuito en los voltajes que además manifiestan un alto contenido de armónico un segundo después del inicio de la falla. Mientras que las corrientes presentan asimetría y aumento de magnitud.

Al momento de la falla el parámetro de distorsión armónica total en el punto de interconexión, mostrado en la Figura 4.17 , tiene un aumento repentino paralelo llegando

hasta 1.49 en la fase en la que ocurre la falla regresando al nivel prefalla en 0.05 segundos, posteriormente a los 0.6 s comienza de nuevo el incremento sostenido en el THD de las tres fases.

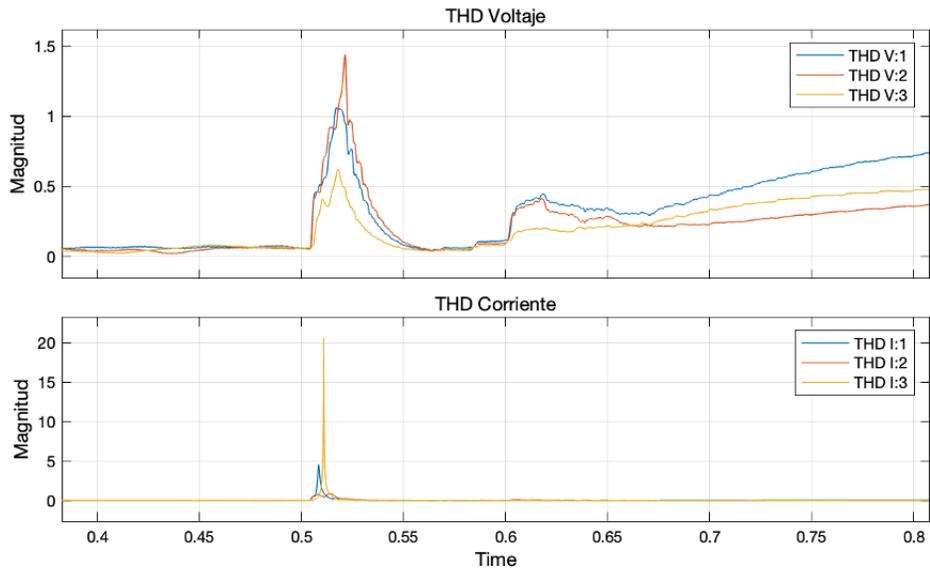


Figura 4.17: Distorsión armónica total en el punto de interconexión.

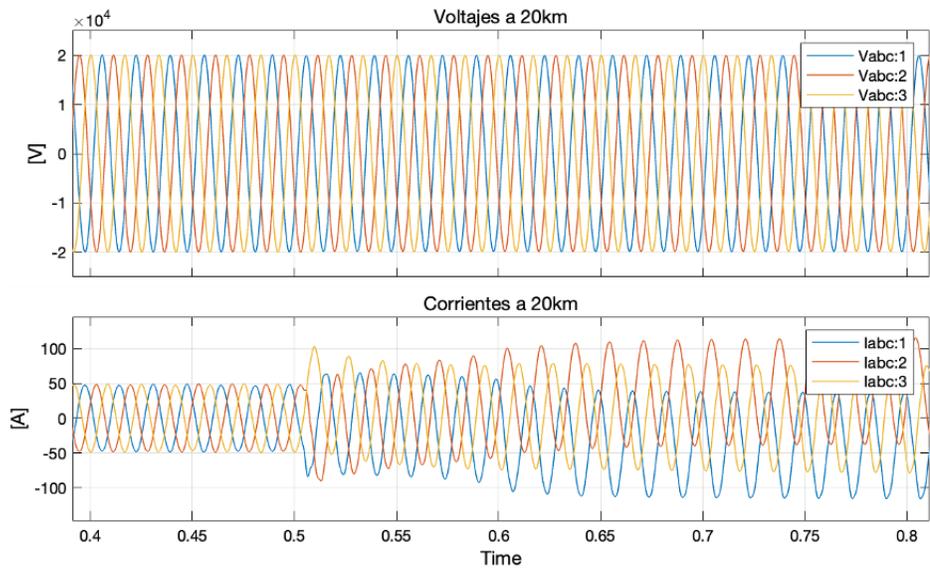


Figura 4.18: Voltajes y corrientes en la red de distribución.

Mientras que el voltaje en la red de distribución se mantiene sin ninguna afectación, la corriente en las tres fases tiene incremento en magnitud y cambios en la simetría.

4.2.2. Circuito abierto

En esta sección se muestra el comportamiento del sistema fotovoltaico con una potencia nominal de $500[kW]$ bajo una falla de circuito abierto en un interruptor.

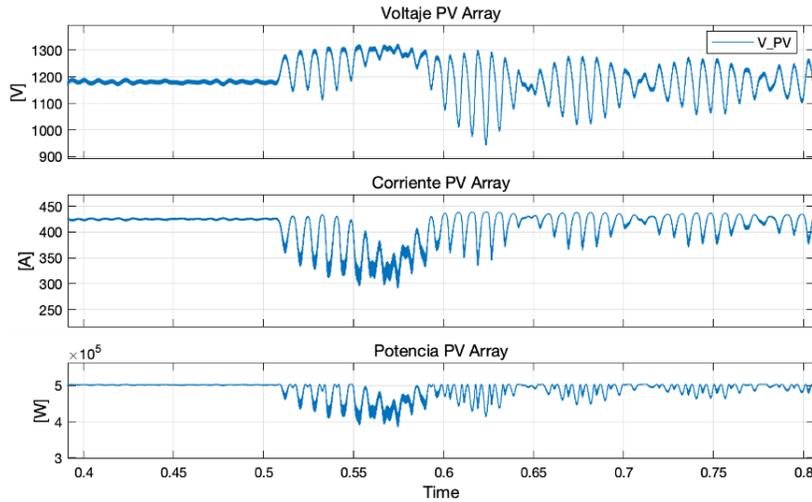


Figura 4.19: Voltaje, corriente y potencia del arreglo fotovoltaico.

En la Figura 4.19 se observa que al iniciar la falla el voltaje del arreglo fotovoltaico presenta oscilaciones mínimas manteniendo un nivel similar al de estado estable mientras la corriente presenta oscilaciones de mayor magnitud que disminuyen un segundo después de que se introduce la falla, al mismo tiempo la potencia que entrega el arreglo a pesar de algunas oscilaciones mantiene su magnitud ($500[kW]$).

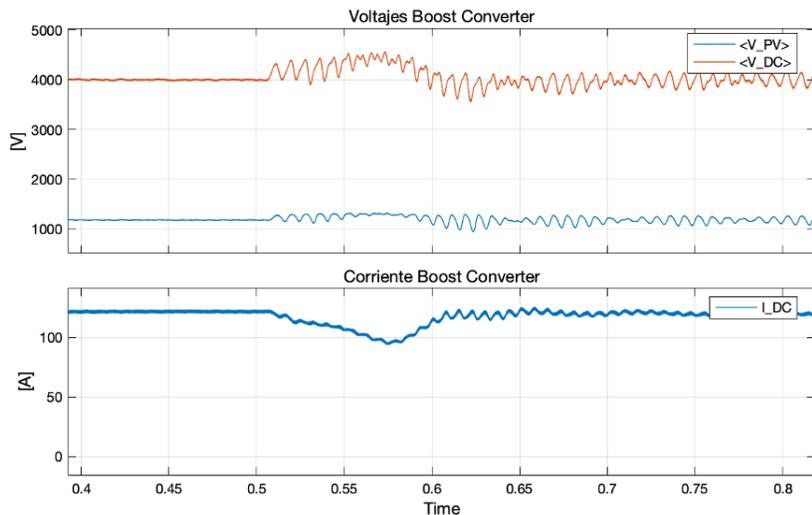


Figura 4.20: Voltajes y corriente en el convertidor boost.

Por tanto en la Figura 4.20 se observa un funcionamiento adecuado del convertidor Boost en el que se incrementa la magnitud del voltaje de entrada junto con las oscilaciones

que presenta el mismo durante la falla.

Las potencias activa y reactiva, mostradas en la Figura 4.21, experimentan cambios alrededor de sus valores prefalla $500[kW]$ y $0[Var]$ respectivamente.

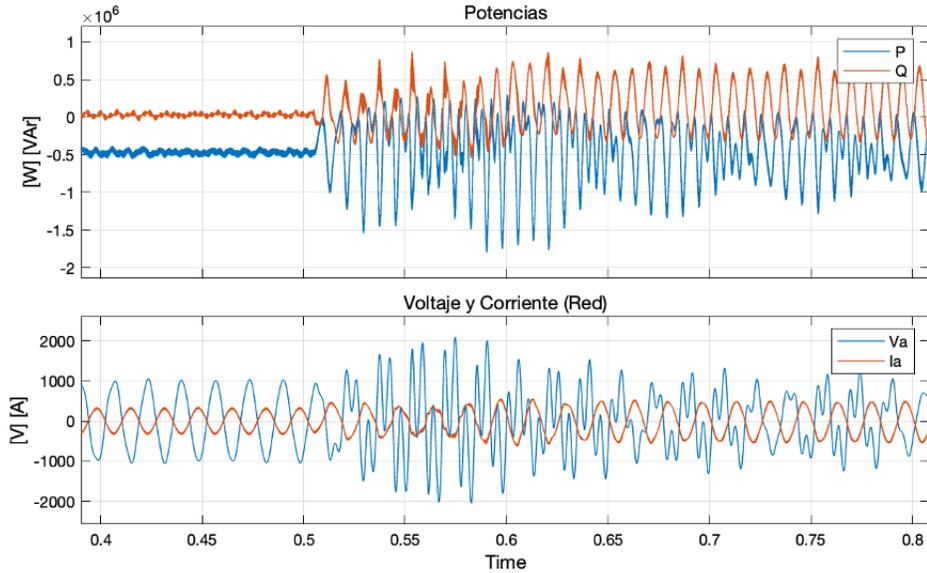


Figura 4.21: Potencia activa y reactiva del sistema fotovoltaico.

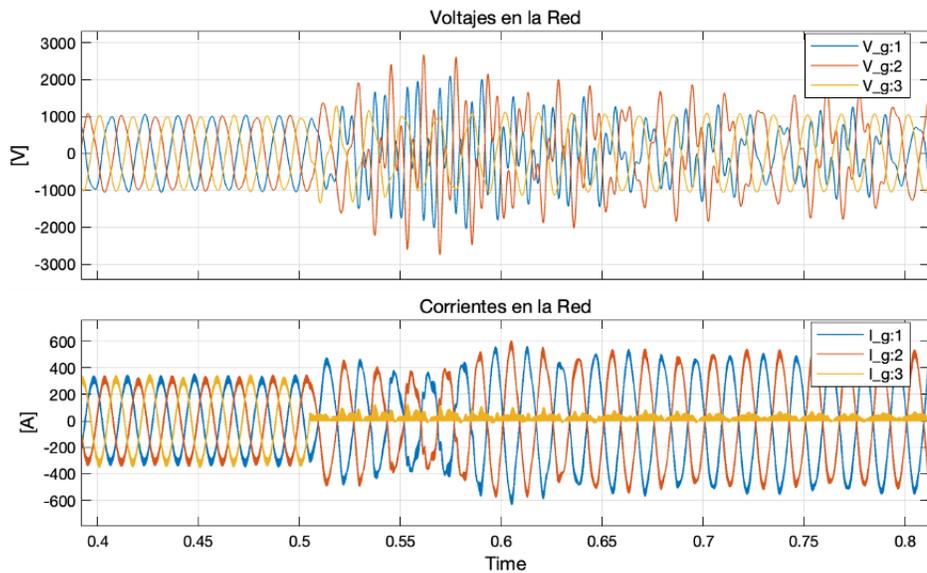


Figura 4.22: Voltajes y corrientes en el punto de interconexión.

Los voltajes en el punto de interconexión que se muestran en la figura anterior tienen un alto contenido armónico en sus tres fases producto de la falla presente en el VSC mientras que las corrientes de las fases no falladas presentan aumento en magnitud la corriente de la fase en la que se presenta la falla disminuye su magnitud muy cercana a cero.

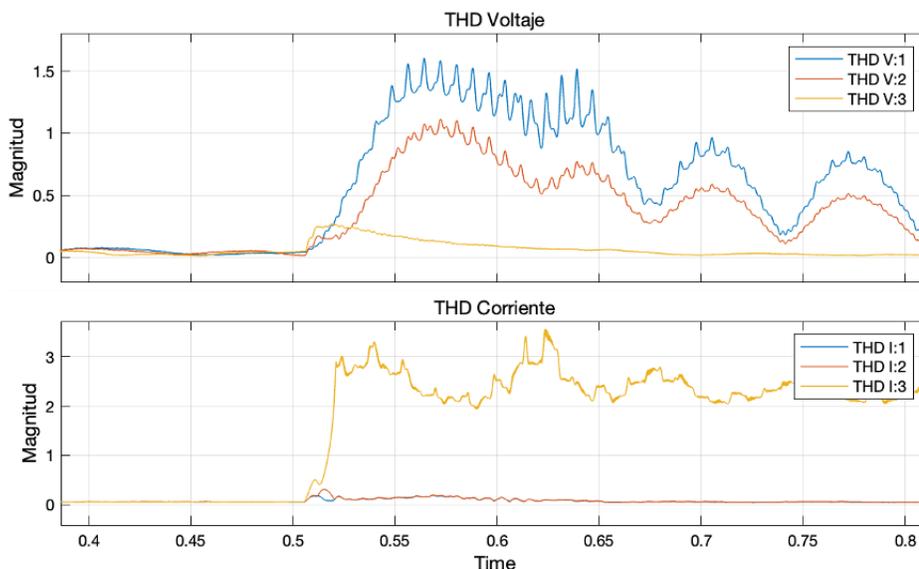


Figura 4.23: Distorsión armónica total en el punto de interconexión.

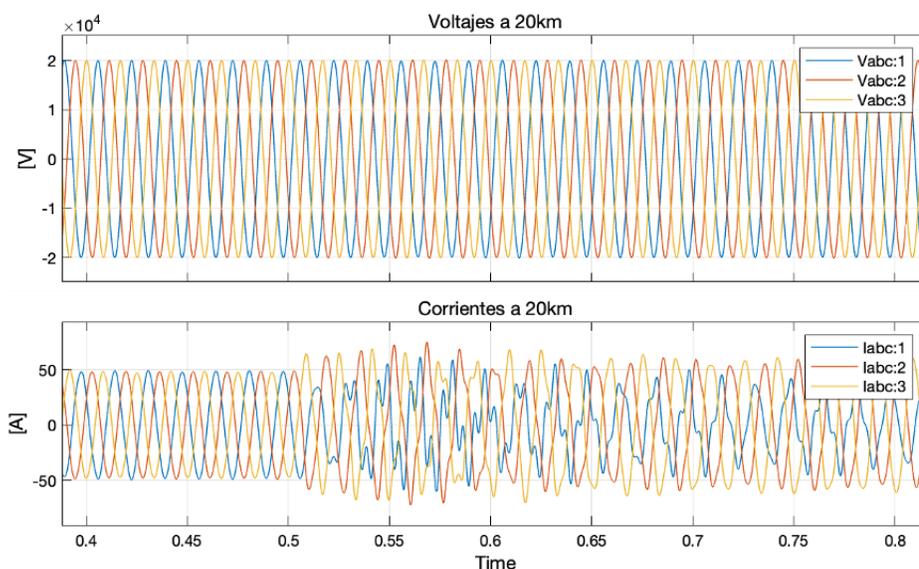


Figura 4.24: Voltajes y corrientes en la red de distribución.

En la Figura 4.23 se muestra el comportamiento de la distorsión total armónica de los voltajes y corrientes del sistema en el punto de interconexión, mientras que se presenta un incremento acelerado en el THD del voltaje de las fases sin falla, llegando hasta 1.5, en la fase en la que se presenta la falla mantiene un THD menor a 0.5. A su vez el THD de la corriente solo tiene incremento, de hasta 3.5, en la fase que presenta la falla.

La falla de circuito abierto en el VSC es perceptible en la distorsión armónica de la corriente de la red de distribución aun cuando la medición se realiza al final de un alimentador de $20[km]$ de distancia, efecto visible en la Figura 4.24.

4.3. Desbalances en la red en la red de distribución

4.3.1. Falla monofásica con resistencia a tierra

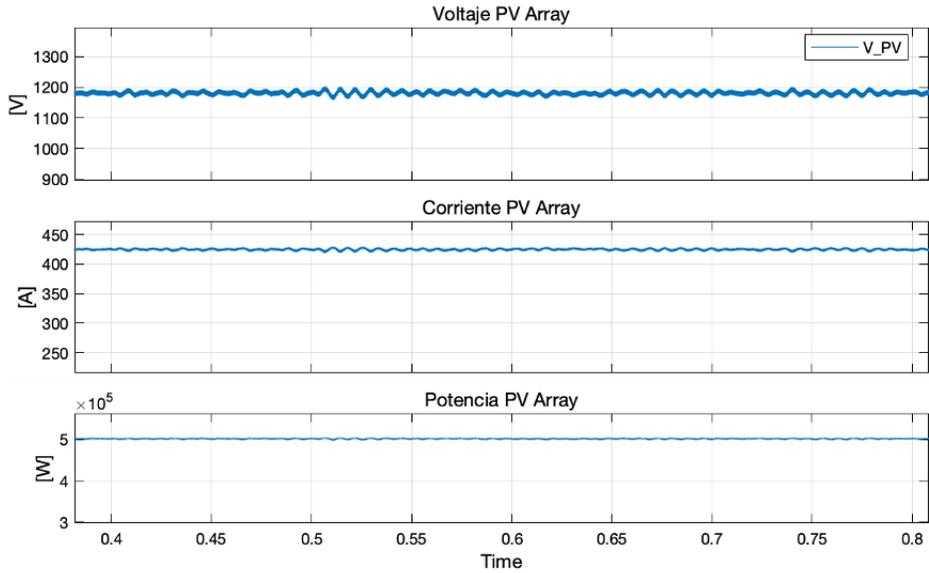


Figura 4.25: Voltaje, corriente y potencia del arreglo fotovoltaico.

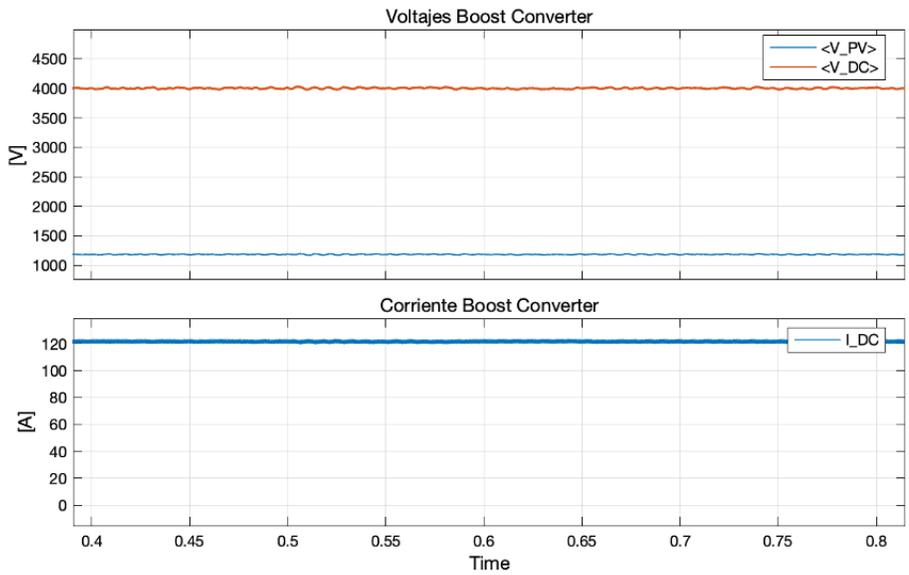


Figura 4.26: Voltajes y corriente en el convertidor boost.

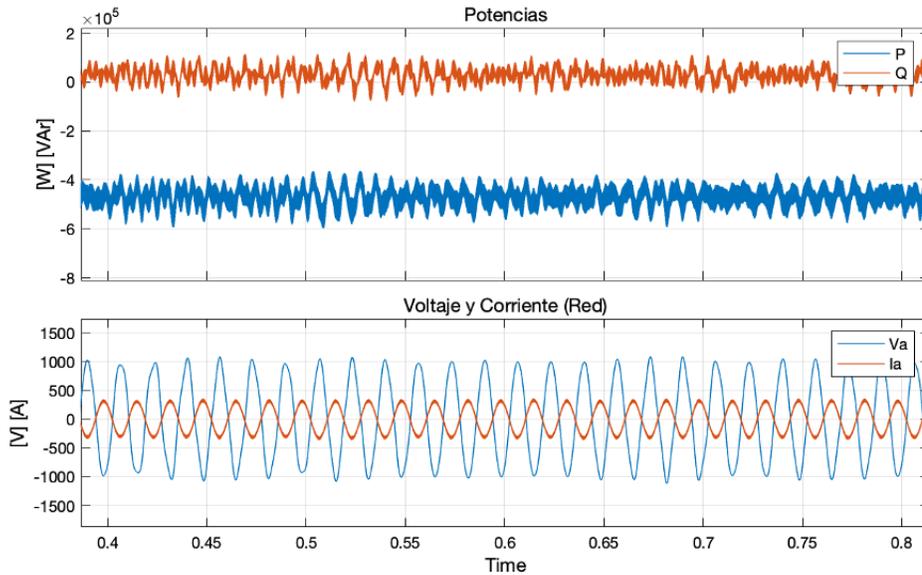


Figura 4.27: Potencia activa y reactiva del sistema fotovoltaico.

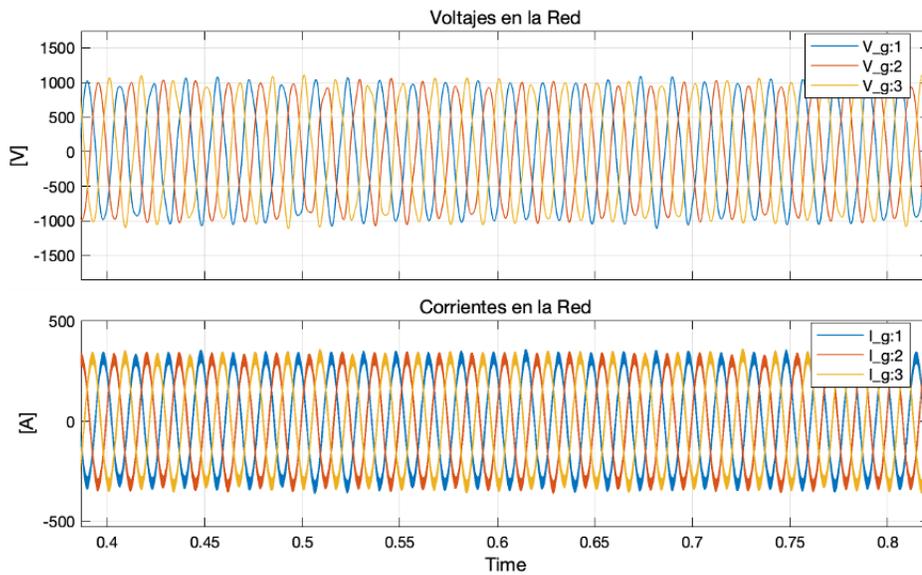


Figura 4.28: Voltajes y corrientes en el punto de interconexión.

Del análisis de las Figuras 4.25 a la 4.29 es posible observar que la falla monofásica generada dentro de la red de distribución, justo después del transformador elevador, no tiene ningún efecto adverso dentro del sistema fotovoltaico.

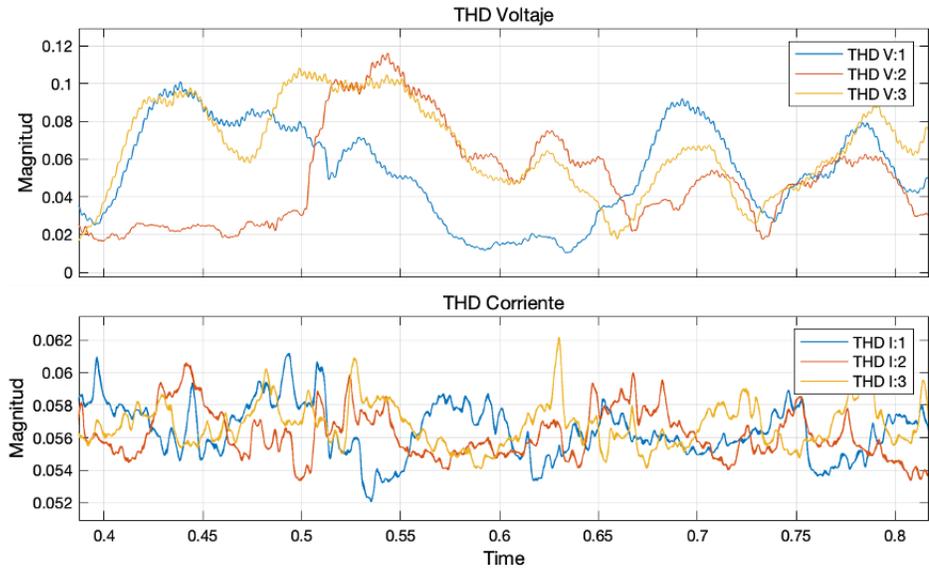


Figura 4.29: Distorsión armónica total en el punto de interconexión.

El sistema tiene un comportamiento análogo al que se muestra en las Figuras 3.15 - 3.17 cuando el sistema opera en condiciones ideales.

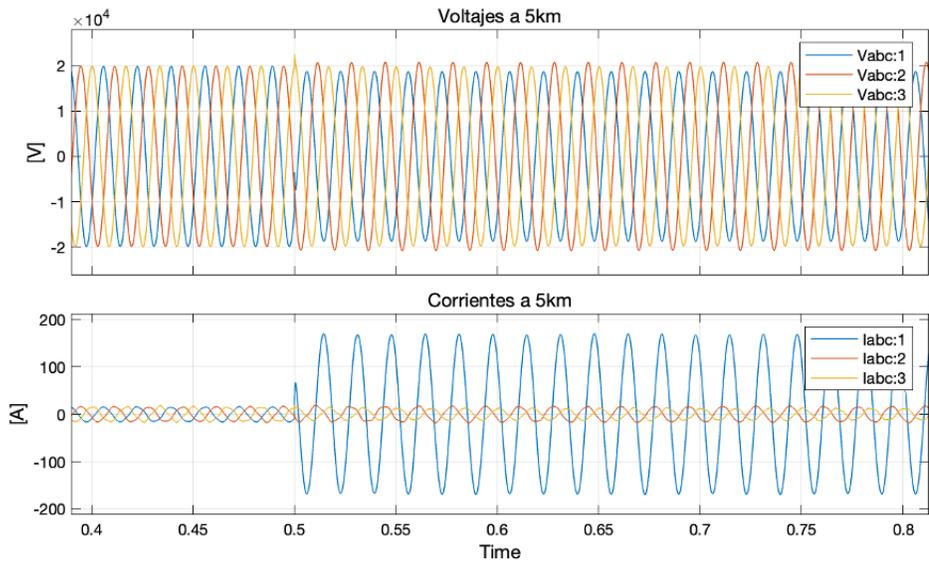


Figura 4.30: Voltajes y corrientes en la red de distribución a 5 [km].

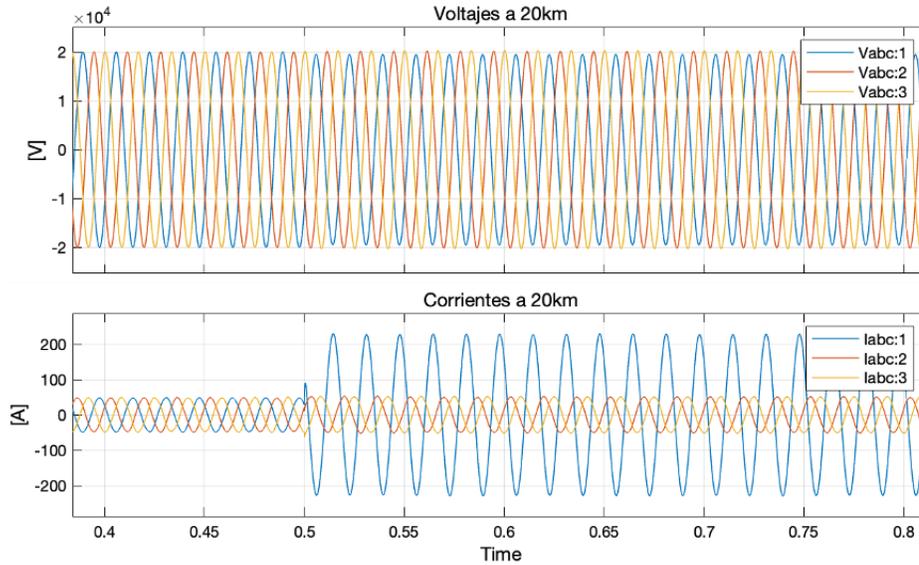


Figura 4.31: Voltajes y corrientes en la red de distribución a 20 [km].

Las Figuras 4.30 y 4.31 muestran aumento de corriente en la fase con falla con un minúsculo efecto de disminución en el voltaje, efectos invisibles para el sistema fotovoltaico que se encuentra al otro lado del transformador elevador.

4.4. Conclusiones particulares

En este capítulo se mostraron y explicaron los efectos de cinco eventos adversos. Cuatro de estos son las fallas de corto circuito y circuito abierto de los transistores de potencia en los convertidores electrónicos que se presentan comúnmente en los sistemas fotovoltaicos.

Mientras que el restante es una falla monofásica dentro de la red de distribución que también es un evento con una alta probabilidad de ocurrencia por factores climáticos y humanos.

Cabe destacar que las fallas se generaron en tres modelos cada uno con una potencia de diseño distinta sin embargo solo se reportan los del sistema de mayor potencia (500 [kW]) esto se debe a que los efectos observados son similares con la particularidad de que en los sistemas de 10 y 50 [kW] las magnitudes de los efectos son menores, es decir la magnitud de los efectos durante la presencia de las fallas es proporcional a la potencia del sistema.

Capítulo 5

Conclusiones

5.1. Aportes

Este trabajo de investigación centrado en las energías renovables, particularmente energía solar fotovoltaica, realizado en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México tiene como aporte principal la obtención de respuestas ante la presencia de fallas dentro y fuera de los modelos de sistema fotovoltaico propuestos con capacidades instaladas estándar y que además cuentan con interconexión a una red de distribución.

Estos modelos permiten observar el comportamiento y la información de las variables presentes en cada una de las etapas que componen al sistema durante condiciones inadecuadas de operación que pueden ser intermitentes o permanentes.

5.2. Trabajos futuros

Tomando como base este trabajo de investigación es posible realizar otros que traigan consigo nuevos conocimientos para distintas áreas dentro de la ingeniería eléctrica.

- Clasificación de las respuestas obtenidas en esta investigación a través de métodos de inteligencia artificial como el algoritmo de percepción difuso que permite detectar patrones.
- Propuesta de protecciones capaces de detectar y aislar el subsistema con falla dentro del sistema fotovoltaico, con el objeto de evitar daños a otros subsistemas y a elementos dentro de red eléctrica de interconexión.
- Obtención de modelos equivalentes para cada tipo de falla propuesta, además de la adición de las fallas por arcos eléctricos y puntos calientes en el arreglo fotovoltaico del sistema.
- Implementación de las protecciones propuestas a diferentes escalas, es decir examinar la acción de las protecciones en cada uno de los subsistemas de interés y posterior-

mente en un sistema fotovoltaico con características similares al que se propone en esta investigación.

5.3. Discusión

La investigación presentada se limitó a generar los casos de falla en un modelo de Matlab Simulink y así obtener las respuestas del sistema fotovoltaico. Sin embargo, el uso de otro software de simulación en el que se obtuvieran respuestas para los mismos casos de falla habría otorgado una forma de comparar las respuestas de ambos programas de simulación y así complementar la investigación.

Por otro lado la implementación de los casos de falla en un modelo físico del sistema fotovoltaico pudo ser una adición que permitiera observar con mayor detalle los efectos de cada una de las fallas.

5.4. Conclusiones finales

Por medio de este trabajo de investigación fue posible implementar modelos computacionales de sistemas fotovoltaicos con capacidades instaladas de 10, 50 y 500 [kW] en los cuales se validó el funcionamiento de cada uno de sus subsistemas o etapas (arreglo fotovoltaico, convertidor boost e inversor) y además se realizó la integración de cada una de las etapas en un modelo general en el cual se implementó un esquema de control para interconexión el cual es capaz de regular el intercambio de potencia y los voltajes con la red de distribución.

Posteriormente se aplicaron cinco casos de falla en cada uno de los modelos realizados: circuito abierto y corto en convertidor boost, circuito abierto y corto en inversor VSC y finalmente falla monofásica dentro de la red de distribución. De cada caso se obtuvieron las respuestas del sistema cuando este se encontraba en estado estable previo a la falla y esta era constante.

Finalmente se realizó el análisis y descripción de las respuestas obtenidas para cada variable relevante para los subsistemas.

Por otro lado la realización de este trabajo cumple con un objetivo personal de contribuir a implementar las energías renovables en nuestro país.

Bibliografía

- [1] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (12 de marzo de 2022). *Solar PV Electricity Generation, World 1990-2019*. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/renewables-information>
- [2] INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (12 de marzo de 2022). *Solar Energy Data, World 2010-2020* <https://www.irena.org/solar>
- [3] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (2020). *Renewables 2020: Analysis and forecast to 2025*, IEA, Paris.
- [4] SHUBBAK, M. H. (2019). *Advances in solar photovoltaics: Technology review and patent trends*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 115(2019). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109383>.
- [5] INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (2021). *Renewable Power Generation Costs in 2020*, Abu Dhabi.
- [6] CENTRO DE INVESTIGACIÓN ECONÓMICA Y PRESUPUESTARIA (13 de marzo de 2022). *Energía solar en México: su potencial y aprovechamiento*. <https://ciep.mx/energia-solar-en-mexico-su-potencial-y-aprovechamiento/>
- [7] ENERGY DATA INFO (13 de marzo de 2022). *Global Solar Atlas*. <https://globalsolaratlas.info/map?c=22.93816,-100.810547,5&r=MEX>
- [8] B. K. BOSE. (2017). *Power Electronics, Smart Grid, and Renewable Energy Systems*, Proceedings of the IEEE, 105(11), 2011-2018, Nov. 2017. <https://doi.org/10.1109/jproc.2017.2745621>.
- [9] DANIEL W. HART. (2010). *Power Electronics (1a ed.)*. McGraw-Hill Education.
- [10] SECRETARÍA DE ENERGÍA. (2019). *PRODESEN 2019–2033*. <https://www.gob.mx/sener/articulos/prodesen-2019-2033-221654>
- [11] HERNÁNDEZ-CALLEJO, L., GALLARDO-SAAVEDRA, S., & ALONSO-GÓMEZ, V. (2019). *A review of photovoltaic systems: Design, operation and maintenance*. Solar Energy, 188, 426–440. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.06.017>
- [12] *Enel Green Power inaugura Don José, México*. (2018, 25 mayo). [Vídeo]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=osKT0i-ihnU>

- [13] WU, Z., HU, Y., WEN, J. X., ZHOU, F., & YE, X. (2020). *A Review for Solar Panel Fire Accident Prevention in Large-Scale PV Applications*. IEEE Access, 8, 132466–132480. <https://doi.org/10.1109/access.2020.3010212>
- [14] ELÉCTRICA CO., LTD DE ZHEJIANG BENYI. (2020, 13 octubre). *Incendios solares - Fallos de arco de CC - Noticias de productos - Noticias - Zhejiang Benyi Electrical Co., Ltd.* <http://m.zjbeny-south-america.com/news/solar-fires-dc-arc-faults-39988422.html>
- [15] KINAST, P. (2019, 22 agosto). *Tesla*. Oficina da Net. <https://www.oficinadanet.com.br/tesla/27273-tesla-se-queimou-com-walmart-e-sofre-processo-apos-incendio-de-paineis-solares>
- [16] ENLIGHT. (s. f.). *Descubre qué puede causar una catástrofe en los sistemas fotovoltaicos*. Recuperado 19 de abril de 2022, de <https://www.enlight.mx/blog/descubre-que-puede-causar-una-catastrofe-en-los-sistemas-fotovoltaicos>
- [17] ROJAS, M. (2014, 21 abril). *Corto circuito, causa de incendio en planta fotovoltaica en BCS*. Milenio. Recuperado 27 de abril de 2022, de <https://www.milenio.com/estados/corto-circuito-causa-incendio-planta-fotovoltaica-bcs>
- [18] ALLIANZ RISK CONSULTING. (2019). *Fire hazards of photovoltaic (PV) systems* [Diapositivas]. Allianz Global Corporate & Specialty. <https://www.agcs.allianz.com/content/dam/onemarketing/agcs/agcs/pdfs-risk-advisory/tech-talks/ARC-Tech-Talk-Vol-8-Fire-Hazards-PV-Systems-EN.pdf>
- [19] REYES, L., FERRUFINO, J., & ÁLVAREZ, H. (2020). *Situación de la Generación de la Energía Eléctrica a través de Energía Fotovoltaica en Honduras Julio 2015 - Marzo 2018*. Revista de la Escuela de Física, 7(2), 83–92. <https://doi.org/10.5377/ref.v7i2.9329>
- [20] BATZELIS, E. I., & PAPATHANASSIOU, S. A. (2016). *A Method for the Analytical Extraction of the Single-Diode PV Model Parameters*. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 7(2), 504–512. <https://doi.org/10.1109/tste.2015.2503435>
- [21] PARK, H., KIM, Y. J., & KIM, H. (2016). *PV Cell Model by Single-diode Electrical Equivalent Circuit*. Journal of Electrical Engineering and Technology, 11(5), 1323–1331. <https://doi.org/10.5370/jeet.2016.11.5.1323>
- [22] HONSBERG, C., & BOWDEN, S. (s. f.). *PVEducation*. PV Education. Recuperado 30 de abril de 2022, de <https://www.pveducation.org/>
- [23] NORDIN, A. H. M., & OMAR, A. M. (2011). *Modeling and simulation of Photovoltaic (PV) array and maximum power point tracker (MPPT) for grid-connected PV system*. 2011 3rd International Symposium & Exhibition in Sustainable Energy & Environment (ISESEE). <https://doi.org/10.1109/isesee.2011.5977080>

- [24] RONDON, F. (2015, 28 octubre). *Sistemas fotovoltaicos: Consideraciones técnicas* [Diapositivas]. Feria Expo Solar. <https://feriaexposolar.com/wp-content/uploads/2018/12/ABB-SKP-Consideraciones-t%C3%A9cnicas-y-Dimensionamiento.pdf>
- [25] HART, D., (2011) *Power Electronics*. New York, USA, Mc Graw Hill.
- [26] JOHAN ÅSTRÖM, K. (2022). *Control System Design.*, Santa Barbara. <https://www.cds.caltech.edu/~murray/courses/cds101/fa02/caltech/astrom-ch6.pdf>
- [27] MAZZONE, V. (s. f.). *Controladores PID*. <https://www.eng.newcastle.edu.au/~jhb519/teaching/caut1/Apuntes/PID.pdf>
- [28] ESRAM, T., & CHAPMAN, P. L. (2007). *Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques*. IEEE Transactions on Energy Conversion, 22(2), 439–449. <https://doi.org/10.1109/tec.2006.874230>
- [29] RUIZ, J. & BERISTÁIN, A. & SOSA-TINOCO, IAN & HERNANDEZ, H. (2010). *Estudio del Algoritmo de Seguimiento de Punto de Máxima Potencia Perturbar y Observar*. Revista de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación 1870-9532. 8. 17.
- [30] SANTOYO-ANAYA, M. A., RODRIGUEZ-RODRIGUEZ, J. R., MORENO-GOYTIA, E. L., VENEGAS-REBOLLAR, V., & SALGADO-HERRERA, N. M. (2018). *Current-Sensorless VSC-PFC Rectifier Control With Enhance Response to Dynamic and Sag Conditions Using a Single PI Loop*. IEEE Transactions on Power Electronics, 33(7), 6403–6415. <https://doi.org/10.1109/tpel.2017.2749213>
- [31] MATLAB SIMULINK, Library: Simscape / Electrical / Specialized Power Systems.
- [32] CANADIAN SOLAR. (2022). *High Ku: High Power Poly Perc Module*. <https://static.csisolar.com/wp-content/uploads/2019/12/07103712/CS-Datasheet-HiKuCS3L-Pv5.9EN.pdf>