



**UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

Facultad de Ingeniería Eléctrica

**Modelado en PSPICE de un Sistema Fotovoltaico
de 12 KW Conectado a la Red Eléctrica**

**Trabajo de tesis para obtener el grado de
Ingeniero Electricista presenta**

Jaime Iván Sosa Hernández

Asesor: Dr. Norberto García Barriga



Marzo, 2013

Para mis adorados padres Yolanda y Jaime

Agradecimientos

- *A Dios padre que nunca se ha olvidado de mí, por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos.*
- *A mis incansables padres por ser el pilar fundamental en todo lo que soy, en toda mi educación, que siempre me han apoyado y por darme la mejor herencia: ser profesionista.*
- *A toda mi familia sin excepción alguna por haber estado conmigo en las buenas y en las malas.*
- *Al Dr. Norberto García Barriga por su incansable paciencia, orientación y por las cosas que aprendí de él y que sin su ayuda no hubiera sido posible este trabajo.*
- *A mi tía Sonia Hernández Almanza por apoyarme a lo largo de mi carrera y a la cual considero como madre.*
- *A la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos de la Comisión Federal de Electricidad por las facilidades que brindaron para realizar este trabajo.*
- *A mi abuelo Antonio Sosa Gómez por sus consejos, sus valores e incansable apoyo.*
- *A mi abuelo Nicolás Hernández Navarro por su gran apoyo en todo momento.*
- *Al Mtro. Isidro Ignacio Lázaro Castillo por su amistad y generosidad que me brindó durante la carrera.*
- *Al Mtro. José Alberto Ávalos González por su amistad y por todo lo que aprendí de él.*
- *Al Dr. Juan Anzures Marín por su amistad y apoyo para los trámites de titulación.*
- *A la Rama Estudiantil IEEE de la UMSNH-FIE por la gran experiencia de pertenecer a un grupo de líderes estudiantiles.*

Resumen

En esta tesis se presenta la simulación de un sistema fotovoltaico conectado a la red eléctrica utilizando el paquete de simulación PSPICE. La parte central de esta tesis consiste en la implementación de un modelo de un módulo fotovoltaico, el cual puede ser interconectado con otros módulos en arreglos serie y paralelo con la finalidad de obtener los niveles de corriente y voltajes requeridos. Se modela un módulo fotovoltaico de 225 W y se reporta su comportamiento eléctrico en términos de su característica de voltaje-corriente ante cambios de irradiancia y temperatura de operación. El modelo del panel fotovoltaico se basa en fuentes de voltaje y corriente, el cual es adecuado para reproducir el comportamiento del panel bajo condiciones arbitrarias de temperatura e irradiancia. Este modelo requiere el valor de la temperatura de la celda, la cual se determina aplicando el concepto conocido como temperatura bajo condiciones de operación nominal. Los resultados obtenidos con este modelo por medio de simulación se comparan de forma adecuada con las características reportadas por el fabricante del módulo fotovoltaico. La conexión del generador fotovoltaico se realiza a través de un inversor monofásico, el cual se modela en este trabajo a la frecuencia fundamental. Así mismo, el sistema eléctrico se modela en PSPICE como un bus infinito alimentando una carga. Se presentan los voltaje, corrientes y potencias que entrega el sistema de generación fotovoltaica a la red eléctrica ante distintas condiciones de irradiancia. Los resultados de simulación se comparan satisfactoriamente con las mediciones realizadas en la instalación de generación fotovoltaica de 12 KW.

Índice general

Dedicatoria	II
Agradecimientos	III
Resumen	IV
Lista de Figuras	VIII
Lista de Tablas	IX
Lista de Símbolos	1
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Descripción del problema	4
1.3 Objetivos	6
1.4 Metodología	6
1.5 Justificación	7
1.6 Descripción por capítulos	8
2 MODELADO EN PSPICE DE UN MÓDULO FOTOVOLTAICO	9
2.1 Recurso solar	9
2.2 Celda fotovoltaica	11
2.3 Módulo fotovoltaico	13
2.3.1 Modelo dependiente de la temperatura	15
2.4 Simulación en PSPICE	18
2.5 Conclusiones	19
3 MODELADO DE UN GENERADOR FOTOVOLTAICO	22
3.1 Introducción	22
3.2 Arreglo fotovoltaico	23
3.3 Unidad de acondicionamiento de potencia	24
3.3.1 Punto de Máxima Potencia	25

3.4	Modelo del inversor	26
3.5	Caso de estudio	28
3.6	Conclusiones	30
4	CASOS DE ESTUDIO	31
4.1	Caso de Estudio 1: Operación con irradiancia constante	32
4.2	Caso de Estudio 2: Operación con irradiancia variable	35
4.3	Caso de Estudio 3: Validación de resultados	39
4.4	Conclusiones	43
5	CONCLUSIONES	44
5.1	Conclusiones generales	44
5.2	Trabajos futuros.	45
	Bibliografía	46

Lista de Figuras

1.1	Producción mundial de energía con instalaciones fotovoltaicas.	2
1.2	Diagrama unifilar del sistema fotovoltaico de 12 KW.	5
2.1	Irradiancia y horas solares pico durante un día soleado.	10
2.2	Orientación de un módulo fotovoltaico para máxima insolación anual.	10
2.3	Mapa de la cantidad de horas solares pico durante los peores meses del año.	11
2.4	Circuito equivalente de una celda solar ideal.	12
2.5	Circuito equivalente de un celda solar no ideal.	12
2.6	Diagrama esquemático de la implementación en PSPICE del módulo fotovoltaico con dependencia a la temperatura.	15
2.7	Diagrama de flujo del modelo matemático del módulo fotovoltaico.	17
2.8	Curva característica proporcionada por el fabricante del módulo Siliken para una temperatura de 25°C y un conjunto de niveles de irradiancia.	20
2.9	Curva característica del módulo Siliken obtenida por simulación para una temperatura de la celda de 25°C y un conjunto de niveles de irradiancia.	20
2.10	Curva característica del fabricante del módulo Siliken para una irradiancia constante de 1000 W/m ² y $T_{celda} = \{25, 40, 55, 70\}$.	21
2.11	Curva característica del módulo Siliken obtenida por la simulación para una irradiancia constante de 1000 W/m ² y $T_{celda} = \{25, 40, 55, 70\}$.	21
3.1	Esquema de conexión típico de un generador fotovoltaico residencial o comercial.	23
3.2	Componentes de la unidad de acondicionamiento de potencia.	25
3.3	Representación esquemática de un inversor.	26
3.4	Implementación en PSPICE del modelo del inversor.	27
3.5	Circuito equivalente del generador fotovoltaico en PSPICE.	28
3.6	Operación del generador para distintos valores de irradiancia con temperatura de la celda de 25°C.	29
3.7	Operación del generador para distintos valores de temperatura ambiente con irradiancia constante de 1000 W/m ² .	29
4.1	Diagrama de bloques del sistema fotovoltaico.	32

4.2	Operación del generador fotovoltaico con un nivel de irradiancia constante de 1000 W/m^2 : a) Nivel de irradiancia. b) Voltaje instantáneo en la salida del inversor. c) Corriente instantánea en la salida del inversor y d) Potencia instantánea que se inyecta a la red eléctrica.	33
4.3	Valores eficaces del generador fotovoltaico: a) Irradiancia. b) Voltaje RMS en la salida del inversor. c) Corriente RMS en la salida del inversor y d) Potencia RMS inyectada a la red eléctrica.	34
4.4	Operación del generador fotovoltaico para un nivel de irradiancia variable: a) Nivel de irradiancia. b) Voltaje de salida. c) Corriente de salida y d) Potencia instantánea.	36
4.5	Valores eficaces del generador fotovoltaico: a) Nivel de irradiancia. b) Voltaje RMS de salida. c) Corriente RMS de salida y d) Potencia RMS inyectada al sistema eléctrico.	37
4.6	Factor de potencia del generador fotovoltaico: a) Nivel de irradiancia y b) Factor de potencia.	38
4.7	Comparación del voltaje en la entrada del inversor obtenido por medición y simulación.	40
4.8	Comparación de la corriente en la entrada del inversor obtenida por medición y simulación.	40
4.9	Voltaje en la salida del inversor.	41
4.10	Corriente en la salida del inversor.	41
4.11	Potencia en la salida del inversor.	42
4.12	Error porcentual en la potencia de salida del inversor.	42

Lista de Tablas

2.1	Parámetros de simulación del módulo fotovoltaico.	18
3.1	Parámetros del módulo y generador fotovoltaico.	28
C.1	Datos eléctricos del módulo Siliken de 225 W.	53
C.2	Parámetros del inversor SMA Sunny Boy.	54

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentan aspectos importantes relacionados con los antecedentes de la energía solar y el estado actual de la utilización de esta energía en el mundo y en nuestro país. Se describe el objetivo general y los objetivos particulares de este trabajo, así como la justificación, metodología y estructura de esta tesis.

1.1. Antecedentes

La energía eléctrica es de vital importancia para el desarrollo económico de cualquier país. La generación y distribución eficiente de dicha energía permite abastecer las necesidades de la industria y proveer energía a la población de forma responsable con el medio ambiente. Además de la energía generada por medio de combustibles fósiles, existe una gran variedad de fuentes de energía renovable entre las que destaca la energía solar. El aprovechamiento de la energía solar permite ahorrar en energías no renovables y reducir el impacto ambiental generado por estas últimas. Si bien las primeras aplicaciones usando energía solar datan de hace mucho tiempo, la primera aplicación industrial de la energía solar a gran escala fue desarrollada en Las Salinas en Chile, en la provincia de Antofagasta en 1872. En este sitio el Ingeniero Charles Wilson instaló un destilador solar de aproximadamente 5,000 metros cuadrados de superficie, que producía alrededor de 21,500 litros por día de agua dulce para la población que trabajaba en las faenas mineras del salitre. Esta instalación funcionó durante cuarenta años hasta que la mina fue abandonada [1].

La historia de la energía fotovoltaica comienza en 1839 cuando el físico francés Edmundo Becquerel fue capaz de generar un voltaje al iluminar un electrodo de metal en una solución de electrolitos débiles. Casi cuarenta años después, Adams y Day fueron los primeros en hacer el estudio del efecto fotovoltaico en materiales de estado sólido [2]. Estos investigadores desarrolla-

ron celdas hechas de selenio con eficiencias de 1 a 2 %. Las celdas de selenio fueron rápidamente adoptadas por la emergente industria de la fotografía para medidores de luz fotométrica.

Como parte del desarrollo de la teoría cuántica, Albert Einstein publicó una explicación teórica del efecto fotovoltaico en 1904 que lo llevó a obtener el Premio Nobel en 1923. Al mismo tiempo, un científico polaco de nombre Czochralski empezó a desarrollar un método para hacer crecer cristales perfectos de silicio. En los años de 1940s y 1950s, el proceso Czochralski empezó a ser usado para hacer la primera generación de silicio mono-cristalino fotovoltaico, cuya técnica continúa dominando la industria fotovoltaica de hoy en día [2]. La utilización práctica de los sistemas fotovoltaicos como una fuente de energía apareció en 1958 cuando fueron usados por primera vez en el espacio para el satélite Vanguard I. Para vehículos espaciales, el costo es menos importante que el peso y la confiabilidad. Por lo tanto, las celdas solares han jugado un papel importante en el suministro de energía a bordo de satélites y otras naves espaciales [2].

La generación fotovoltaica tiene una presencia cada vez más importante en los sistemas de potencia debido a la habilidad de producir energía libre de emisiones contaminantes en el punto del sistema en donde se encuentran las cargas. La principal ventaja de estos sistemas de generación respecto de otras fuentes de energía renovable es la posibilidad de que los usuarios posean y operen los pequeños sistemas fotovoltaicos. Factores de tipo económico, político y el deseo de contar con este tipo de instalación de fuentes renovables de energía han producido un incremento significativo de la instalación de sistemas de pequeña escala del orden de 1 KW en los sistemas de distribución. En países como los Estados Unidos y Japón existen programas gubernamentales que incentivan la instalación de estos sistemas de generación. Por ejemplo, la Figura 1.1 muestra la tendencia de producción de energía eléctrica usando instalaciones fotovoltaicas [3]. Se puede apreciar que la producción mundial alcanzó casi 24 GW en el año 2010.

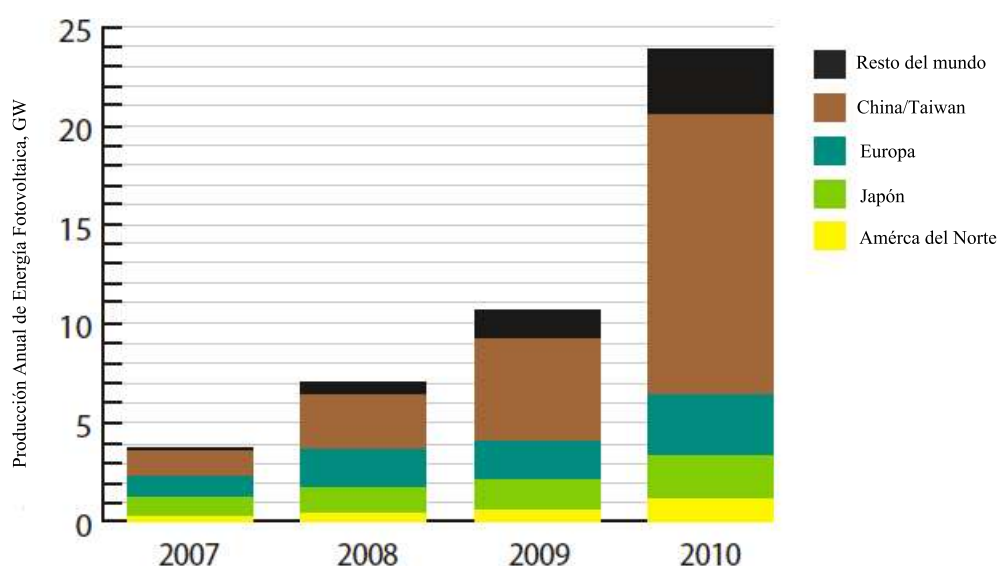


Figura 1.1: Producción mundial de energía con instalaciones fotovoltaicas.

La investigación y desarrollo de la tecnología fotovoltaica en nuestro país se remonta a la década de los 70's. El CINVESTAV del Instituto Politécnico Nacional inició la manufactura de celdas fotovoltaicas y su ensamble en módulos. En 1978 se puso en operación una planta piloto para fabricar 4 KW por año. La capacidad de la planta posteriormente fue incrementada hasta 20 KW. Algunas otras instituciones como el Laboratorio de Energía Solar de la UNAM han realizado investigaciones en materiales para celdas fotovoltaicas [4]. En 1979, el Instituto de Investigaciones Eléctricas inició un proyecto relacionado con la ingeniería de plantas fotovoltaicas. A partir de los 90's la investigación se dirigió hacia pequeñas aplicaciones fotovoltaicas en zonas aisladas. Actualmente los trabajos de investigación se han dirigido hacia los sistemas fuera de red, que incluye los sistemas fotovoltaicos domiciliarios para electrificación rural y los sistemas híbridos, solar-eólico-diesel. En lo que respecta a sistemas fotovoltaicos conectados a la red eléctrica las investigaciones se han enfocado en sistemas que pueden ser utilizados para dar soporte y alivio térmico a líneas de distribución en zonas con grandes picos de demanda durante el verano, el cual está asociado al uso de aire acondicionado [4].

El potencial de energía solar en México es uno de los más altos del mundo. Aproximadamente tres cuartas partes del territorio nacional son zonas con una insolación media de 5 KWh/m^2 al día. La CONAE considera que en 2001 se contaba con pequeñas instalaciones de más de 115 mil metros cuadrados en sistemas fotovoltaicos instalados en el país, que generan cerca de 8.4 GWh/año [4]. Actualmente, CFE cuenta con una planta híbrida en San Juanito, Baja California Sur, conformada por 17 KW fotovoltaicos, 100 KW eólicos y un generador diesel de 80KW. Adicionalmente se encuentra en proyecto la instalación de una planta híbrida de ciclo combinado termosolar al noroeste de México, con una capacidad de 39 MW. En el año 2011 comenzó a operar en Santa Rosalía, Baja California, una central solar fotovoltaica piloto de 1 MW, integrada por módulos fotovoltaicos con estructura soporte con seguimiento en un eje, que se interconecta al sistema aislado de Santa Rosalía a través de una línea de distribución de 34.5 KV. En el año 2012 entró en operación una central solar fotovoltaica de 5 MW, en Cerro Prieto, Baja California, en las cercanías de la ciudad de Mexicali [5].

La revisión de la literatura relacionada al análisis y simulación demuestra que se ha usado distintas plataformas de simulación para caracterizar sistemas fotovoltaicos conectados a la red eléctrica. En el año 2006 se realizó una investigación en la Universidad Politécnica de Cataluña, España, para analizar el comportamiento de un inversor conectado a un generador fotovoltaico ante un falla en la red eléctrica mediante simulaciones en PSPICE. El modelo realizado se basó en el método de control del voltaje de salida del inversor y se llegó a la conclusión que el voltaje de salida del inversor es sensible ante repentinos cambios de la corriente de referencia y ausencia de tensión de CA. Además el método requiere de conocimiento de valores exactos de las pérdidas resistivas y la inductancia de filtro [6]. En [7] se presenta el análisis de un sistema fotovoltaico conectado a un inversor trifásico, llevando a cabo el diseño y simulaciones en el paquete de simulación Simulink, con el objetivo de modelar un inversor que sea capaz de operar con el factor de potencia unitario.

1.2. Descripción del problema

En esta tesis se presenta el modelado de un sistema fotovoltaico conectado a la red, el cual se encuentra actualmente operando en las instalaciones de la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos de Comisión Federal de Electricidad. El sistema fotovoltaico tiene una capacidad total de 12 KW, el cual está constituido por tres circuitos monofásicos de 4 KW. Cada circuito posee un arreglo de 9 x 2 módulos fotovoltaicos entregando una potencia total de 4 KW por cada una de las tres fases. Cada módulo está formado por 60 celdas conectadas en serie. El generador fotovoltaico se conecta a la red mediante un inversor monofásico de la marca comercial SMA America modelo Sunny Boy de 5 KW. La instalación fotovoltaica entrega un voltaje senoidal de 220 V a una frecuencia de 60 HZ. En la Figura 1.2 se muestra el diagrama unifilar de la instalación del sistema fotovoltaico. Se puede apreciar que el sistema fotovoltaico cuenta con tres inversores monofásicos, cada uno con protecciones adecuadas en el lado de corriente directa y corriente alterna. También se puede observar la configuración de la conexión a la red eléctrica del conjunto de inversores conectados a la red trifásica.

Los inversores poseen la característica de operar en el punto de máxima potencia de tal manera que el voltaje en la entrada del inversor se controla para que el arreglo fotovoltaico opera en el punto máximo de potencia. Además, el inversor es capaz de regular la magnitud de la corriente en el lado de CA incluso durante disturbios. De esta manera, se asegura que los elementos de conmutación del inversor trabajarán dentro de sus límites de corriente y temperatura. De igual forma, el inversor tiene la capacidad de cambiar el factor de potencia tomando en cuenta los límites de corriente y temperatura. Por lo tanto, el inversor puede ayudar a proveer la demanda de potencia reactiva local mediante sistemas de control adecuados. Además, el inversor posee un filtro y un transformador de aislamiento que le permite reducir la inyección de armónicos a la red.

Esta instalación se encuentra monitoreada permanentemente y se tiene mediciones diarias de las principales variables eléctricas. Además, se cuenta con una estación meteorológica ubicada en la azotea del edificio.

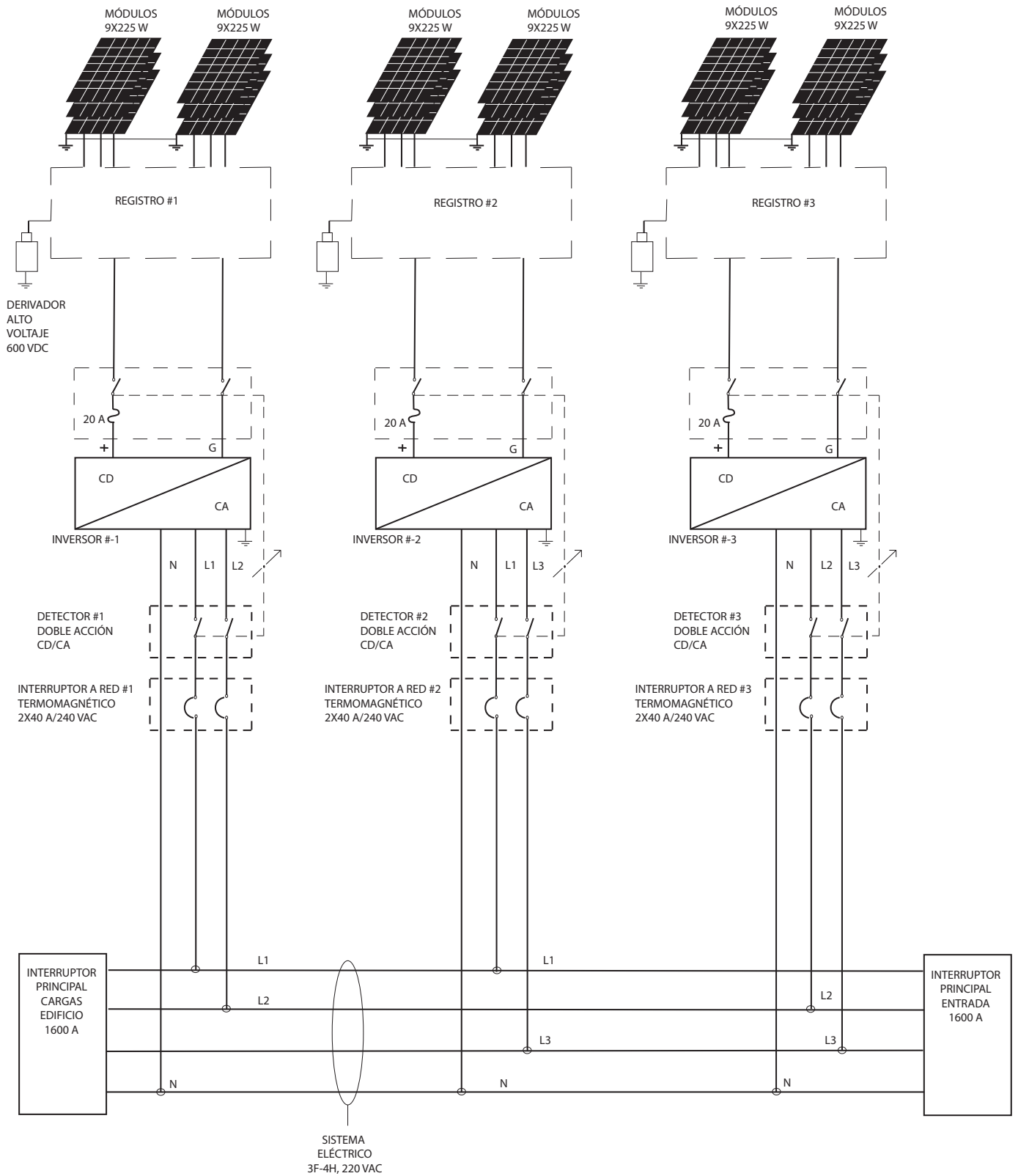


Figura 1.2: Diagrama unifilar del sistema fotovoltaico de 12 KW.

1.3. Objetivos

El objetivo general de esta tesis es realizar el modelado y análisis de la operación de un sistema de generación fotovoltaico de 12 KW conectado a la red de Comisión Federal de Electricidad. El modelado y simulación del sistema de generación se realiza en PSPICE.

Los objetivos particulares de esta tesis son:

- Modelar un módulo fotovoltaico comercial de 225W.
- Generar las curvas características V-I del panel fotovoltaico en el software PSPICE.
- Modelar un inversor monofásico para acoplar paneles fotovoltaicos a la red eléctrica.
- Simular la operación conjunta del generador fotovoltaico, convertidor inversor y la red eléctrica.
- Analizar y validar el desempeño del sistema fotovoltaico ante variaciones de irradiancia y temperatura.

1.4. Metodología

En este trabajo de tesis se presenta el desarrollo de un modelo de un sistema de generación fotovoltaico conectado a la red eléctrica. El modelo matemático del sistema de generación está constituido por el modelado matemático de cada componente del sistema fotovoltaico y una representación simplificada de la red a la cual se conecta. Se desarrolla una herramienta de simulación con el paquete de simulación PSPICE, el cual se utiliza para simular el comportamiento del generador fotovoltaico conectado a un bus infinito.

El modelado matemático del generador fotovoltaico está compuesto de dos partes principales: el arreglo de módulos fotovoltaicos y la unidad de acondicionamiento de energía constituida por un inversor de electrónica de potencia. Primeramente el modelo del arreglo fotovoltaico calcula la potencia de CD de salida para unas condiciones ambientales específicas. Posteriormente, el modelo del inversor convierte la potencia de CD a una potencia de CA que se inyecta al sistema.

En esta tesis se elige el paquete de simulación PSPICE para modelar un panel fotovoltaico. La estructura de programación de este simulador facilita el desarrollo modular de los programas y ayuda al desarrollo de las etapas de diseño, dimensionamiento y análisis del sistema fotovoltaico. El comportamiento del módulo fotovoltaico se describe por medio de fuentes

de voltaje y corriente y una resistencia en serie. La dependencia de la temperatura se introduce utilizando el concepto de temperatura a condición nominal de operación. El inversor monofásico se modela utilizando una representación a frecuencia fundamental. El simulador se alimenta con datos de irradiancia y temperatura ambiente proporcionados por la estación meteorológica de CFE.

1.5. Justificación

En México como en muchos países en desarrollo, el uso de sistemas fotovoltaicos conectados a la red es aún un campo muy poco explorado. La energía solar es un ejemplo claro del potencial con el que se cuenta en este país, en donde se requiere la inversión en proyectos que impulsen este tipo de energía. Los mapas de radiación solar y mediciones generales indican que más de la mitad del territorio nacional tiene una irradiación media anual de 5 KW/m^2 . Existen extensas zonas desérticas en nuestro país que podrían contribuir a satisfacer la demanda nacional de electricidad. Por ejemplo, 100,000 MW de centrales solares instaladas en una superficie de mil kilómetros cuadrados son capaces de producir 200, 000 GWh al año, cifra muy próxima a la demanda nacional actual de electricidad [8]. Estos números dan una idea concreta del potencial solar y de la necesidad de profundizar en su estudio.

Si bien la generación fotovoltaica no es una tecnología nueva, diversos factores socio-económicos en distintos países han causado un incremento significativo en la potencia total instalada conectada a la red eléctrica. Tomando en cuenta que la generación fotovoltaica le pertenece al consumidor y es operada por el mismo, los planificadores y operadores tienen poco conocimiento y control sobre estos sistemas y, sin embargo, es su responsabilidad mantener operando dichas redes. Una situación similar ocurre con las cargas del sistema, en donde el consumidor determina el comportamiento diario de dicha carga. Sin embargo, en el caso de las cargas la compañía proveedora de energía tiene más control sobre nuevas cargas conectadas al sistema, mientras que la localización y el tamaño de los generadores fotovoltaicos lo determina el consumidor. Conforme se incrementa la capacidad instalada de sistemas fotovoltaicos, los operarios del sistema enfrentarán un conjunto de problemas y retos que requieren nuevas soluciones ingenieriles.

Por otra parte, este proyecto de tesis surge de la necesidad de Comisión Federal de Electricidad de desarrollar un modelo del sistema fotovoltaico conectado a la red ubicado en sus instalaciones. Los fabricantes de dichos equipos no proveen modelos digitales de los componentes y, por lo tanto, no es posible analizar el comportamiento de estos equipos bajo distintas condiciones de operación. Así mismo, los programas y modelos desarrollados en esta tesis se pueden adaptar para analizar instalaciones fotovoltaicas de grandes dimensiones que se instalen en nuestro país.

1.6. Descripción por capítulos

En el Capítulo 1 se presentan los antecedentes más relevantes en el área de la energía solar y de sistemas fotovoltaicos. Además, se presenta la descripción del problema, objetivos, metodología y justificación de esta tesis.

En el Capítulo 2 se presenta el modelo básico de la celda fotovoltaica, la cual es modelado como un diodo ideal. Además, se presenta el modelado de un módulo fotovoltaico utilizando un modelo de comportamiento usando fuentes de voltaje y corriente y una resistencia en serie. Además, se comparan los resultados obtenidos por simulación con los datos proporcionados por el fabricante del módulo comercial.

En el Capítulo 3 se presenta el modelado de un generador fotovoltaico y los resultados de simulación bajo distintas condiciones de temperatura e irradiancia.

En el Capítulo 4 se presentan casos de estudio del sistema fotovoltaico conectado a la red. Se presentan resultados de simulación del sistema ante distintas condiciones de temperatura e irradiancia. Además se validan los resultados con mediciones de la instalación fotovoltaica.

En el Capítulo 5 se presenta las conclusiones generales del proyecto de tesis y los trabajos futuros.

Capítulo 2

MODELADO EN PSPICE DE UN MÓDULO FOTOVOLTAICO

En este capítulo se presenta la implementación en PSPICE de un módulo fotovoltaico, el modelo utilizado ha sido reportado previamente en la literatura [11]. El modelo del panel fotovoltaico incorpora las características de dependencia a la temperatura y conversión a valores arbitrarios de irradiancia. Los resultados de la simulación en PSPICE se comparan con la información provista por los fabricantes de los paneles fotovoltaicos.

2.1. Recurso solar

La irradiancia se define como la radiación solar que recibe una superficie en la tierra, medida en unidades de Watts por metro cuadrado (W/m^2). Este parámetro alcanza un máximo de 1000 a 1200 W/m^2 al medio día y disminuye considerablemente cuando la radiación directa es bloqueada por nubes, montañas y edificios. La Figura 2.1 muestra un perfil de irradiancia típico durante un periodo de tiempo de 24 horas. La cantidad de energía solar recibida durante un intervalo de tiempo se conoce como insolación y se mide en unidades Watts-hora por metros cuadrados (Wh/m^2).

La insolación comúnmente se expresa en términos de horas solares pico, en donde una hora solar pico es equivalente a la energía recibida durante una hora con una irradiancia promedio de 1000 W/m^2 (ver Figura 2.1). La energía útil que produce el arreglo fotovoltaico es directamente proporcional a la insolación del sitio [9].

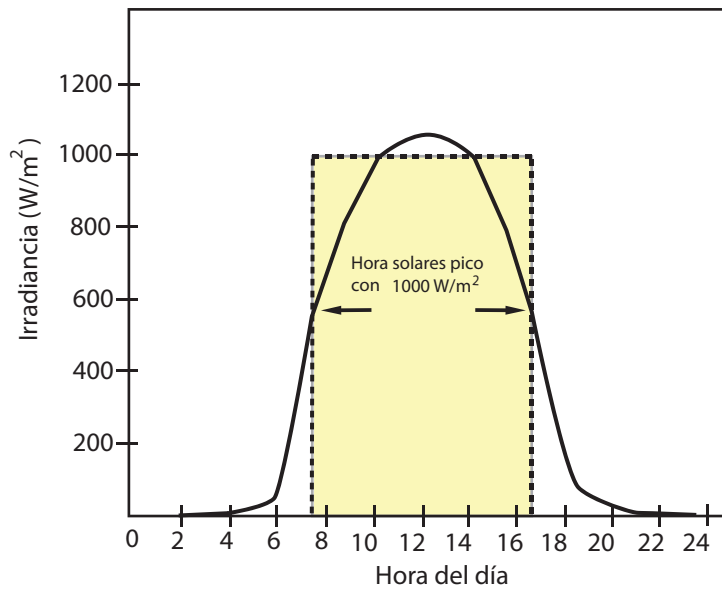


Figura 2.1: Irradiancia y horas solares pico durante un día soleado.

Para que un arreglo fotovoltaico reciba la máxima insolación posible se requiere hacer un ajuste en la orientación usando dos ángulos. El ángulo azimutal permite seguir el movimiento diario del sol de este a oeste, el cual debe fijarse en la dirección del sur verdadero. Por su parte, el ángulo de elevación permite seguir el movimiento anual de la trayectoria solar en la dirección norte-sur y debe ser igual a la latitud geográfica del lugar (ver Figura 2.2).

México posee un excelente potencial de energía solar en gran parte de su territorio. La Figura 2.3 muestra el nivel de insolación en horas solares pico en los peores meses del año para México [10]. Se puede apreciar de esta figura que en general todo el territorio mexicano presenta un número de horas al día por arriba de 4 horas. Además, se puede apreciar un recurso sobresaliente por arriba de 5 horas diarias en el norte del país y en la costa de los estados de Oaxaca, Guerrero, Michoacán, Colima y Jalisco.

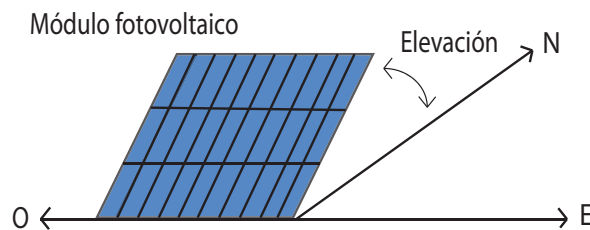


Figura 2.2: Orientación de un módulo fotovoltaico para máxima insolación anual.

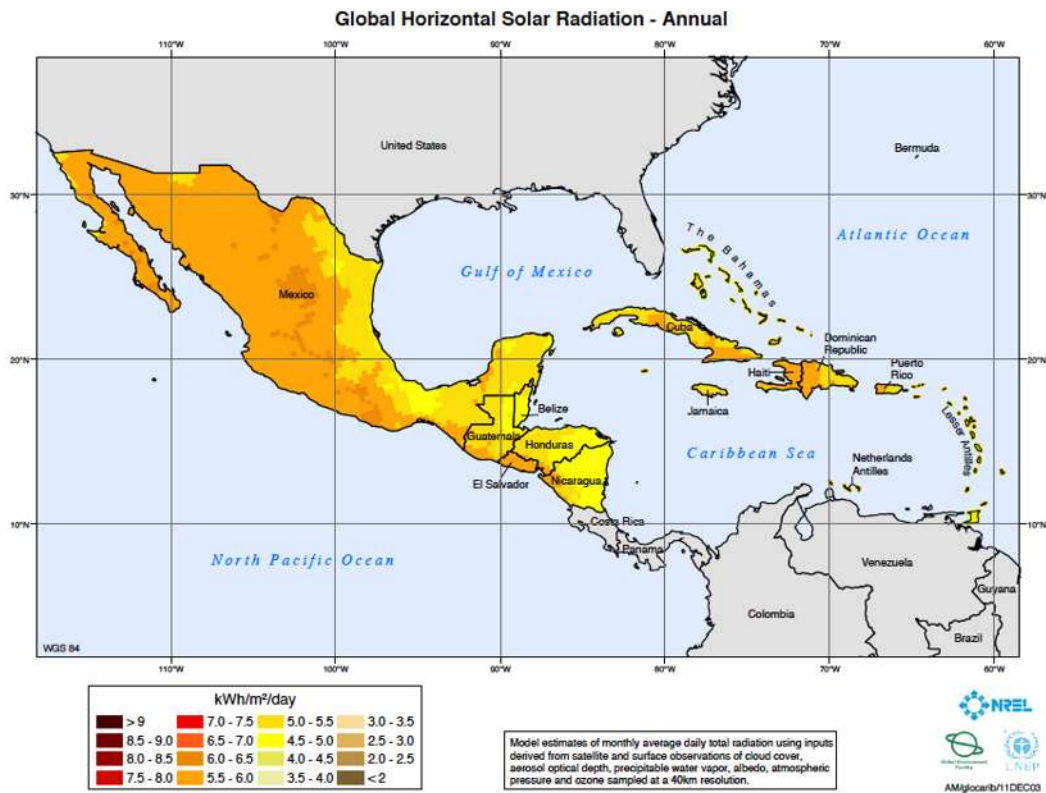


Figura 2.3: Mapa de la cantidad de horas solares pico durante los peores meses del año.

2.2. Celda fotovoltaica

Los módulos fotovoltaicos están formados por un conjunto de celdas que producen electricidad a partir de la luz solar que incide sobre ellas. La estructura básica de un módulo fotovoltaico para aplicaciones terrestres consiste en un número de celdas fotovoltaicas conectadas en serie. La cantidad de energía generada depende de variables tales como la radiación solar y de la temperatura de las celdas.

Cuando la celda solar no está iluminada posee las características eléctricas de un diodo ideal, en donde la corriente producida se conoce como corriente oscura I_d . La corriente en la celda solar que resulta de la radiación solar se conoce como corriente fotogenerada, la cual sigue una dirección contraria a la corriente oscura. El valor de esta corriente permanece constante independientemente del voltaje externo y por lo tanto se puede medir por medio de la corriente de corto circuito I_{sc} . Esta corriente varía proporcionalmente con la intensidad de la radiación solar. La celda fotovoltaica es un dispositivo semiconductor que se comporta como una fuente de corriente cuando incide sobre ella un flujo de radiación solar proveniente del sol. Las características eléctricas de una celda solar difieren muy poco de las de un diodo. Por lo tanto, el circuito equivalente de una celda solar puede ser representado por una fuente de corriente en paralelo con un diodo (ver Figura 2.4).

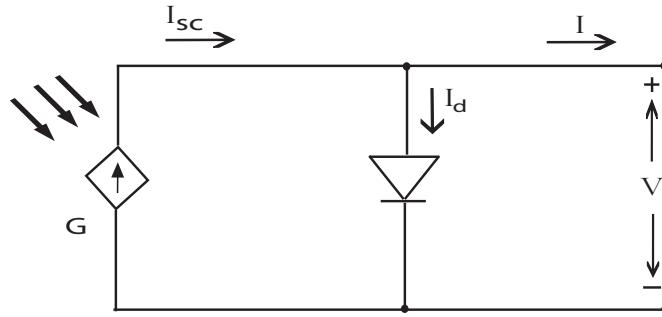


Figura 2.4: Circuito equivalente de una celda solar ideal.

La corriente total se describe como la diferencia entre la corriente oscura y la corriente fotónica. En la Figura 2.4 la fuente de corriente dependiente G representa la radiación solar, I_{sc} es la corriente de corto circuito, I_d es la corriente del diodo, I es la corriente de salida y V el voltaje en terminales. En una celda solar la irradiancia que incide sobre ella se transforma en una corriente de corto circuito proporcional a dicha irradiancia. Esta acción de proporcionalidad la representa la fuente G en la Figura 2.4.

El valor de la corriente generada por la celda solar ideal es dado por [11],

$$I = I_{sc} - I_0 \left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right) \quad (2.1)$$

en donde V_T es el potencial térmico, V es el voltaje de salida la celda, I_d es la corriente de saturación del diodo e I_{sc} es la corriente de corto circuito de la celda.

El modelo de la celda fotovoltaica mostrado previamente no toma en cuenta varios efectos que en la práctica influyen en la respuesta de la celda. Por lo tanto, en la Figura 2.5 se presenta el modelo generalizado de la celda solar. Se puede apreciar que dicho modelo contiene una fuente de corriente, dos diodos y dos resistencias equivalentes.

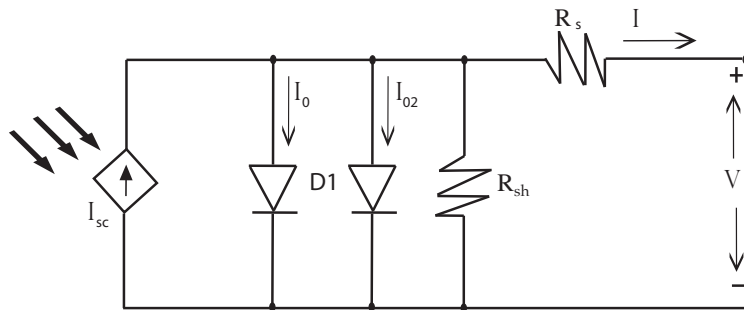


Figura 2.5: Circuito equivalente de un celda solar no ideal.

Este modelo se describe como,

$$I = I_{sc} - I_0 \left(e^{\frac{V + IR_s}{nV_T}} - 1 \right) - I_{02} \left(e^{\frac{V + IR_s}{2V_T}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (2.2)$$

en donde R_s es la resistencia en serie, R_{sh} es la resistencia en paralelo, n es la constante ideal del diodo, V_T es el potencial térmico de la celda, V es el voltaje de la celda, I_0 es la corriente de saturación del diodo e I_{02} es la corriente de saturación del segundo diodo en paralelo.

El potencial térmico V_T se define como,

$$V_T = \frac{KT_{cell}}{q} \quad (2.3)$$

en donde

K es la constante de Boltzman $1.38 \times 10^{-23} \frac{J}{^\circ K}$

$q = 1.6 \times 10^{-19} \text{coulomb}$

T_{cell} temperatura de la celda en $^\circ K$

2.3. Módulo fotovoltaico

Asumiendo que el efecto del segundo diodo y la resistencia en paralelo R_{sh} son despreciables en (2.2) entonces se obtiene la siguiente expresión simplificada haciendo $I_{02} = 0$ y $R_{sh} = \infty$,

$$I = I_{sc} - I_0 \left(e^{\frac{V + IR_s}{nV_T}} - 1 \right) \quad (2.4)$$

El modelo de un módulo fotovoltaico constituido por $N_s \times N_p$ celdas fotovoltaicas se obtiene al escalar la característica $I(V)$ de una celda fotovoltaica. Los parámetros del módulo se definen como,

$$I_M = N_p I \quad (2.5)$$

$$I_{scM} = N_p I_{sc} \quad (2.6)$$

$$V_M = N_S V \quad (2.7)$$

$$V_{ocM} = N_S V_{oc} \quad (2.8)$$

en donde N_S es el número de celdas en serie, N_P es el número de celdas en paralelo y el subíndice M indica la variable asociada al módulo fotovoltaico.

La regla de escalamiento para la resistencia se define como,

$$R_{sM} = \frac{N_P}{N_S} R_s \quad (2.9)$$

Sustituyendo (2.5) a (2.9) en la Ecuación (2.4) y resolviendo para I_M se tiene,

$$I_M = I_{scM} - N_P I_0 \left(e^{\frac{V_M + I_M R_{sM}}{n N_S V_T}} - 1 \right) \quad (2.10)$$

Por otra parte, resolviendo la Ecuación (2.4) para I_0 ,

$$I_0 = \frac{I_{sc}}{\left(e^{\frac{V_{oc}}{n V_T}} - 1 \right)} \quad (2.11)$$

Sustituyendo las ecuaciones (2.6) y (2.8) en (2.11) se tiene,

$$I_0 = \frac{I_{scM}}{N_P \left[e^{\frac{V_{ocM}}{n V_T N_S}} - 1 \right]} \quad (2.12)$$

Sustituyendo la Ecuación (2.12) en la Ecuación (2.10) y resolviendo para I_M se tiene,

$$I_M = I_{scM} - I_{scM} \frac{e^{\frac{V_M + I_M R_{sM}}{n V_T N_S}} - 1}{e^{\frac{V_{ocM}}{n V_T N_S}} - 1} \quad (2.13)$$

La resistencia serie del módulo R_{sM} se define como,

$$R_{sM} = \frac{V_{ocM}}{I_{scM}} - \frac{P_{maxM}}{F F_{0M} I_{scM}^2} \quad (2.14)$$

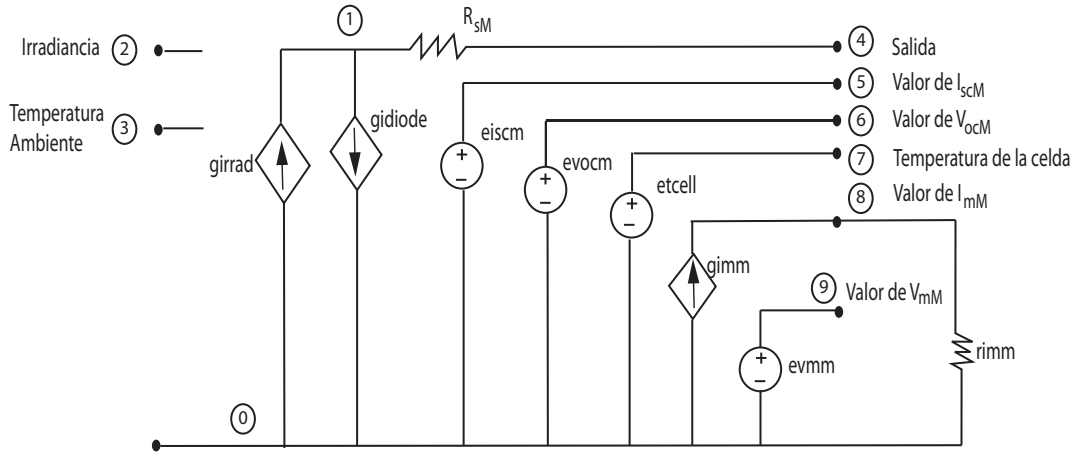


Figura 2.6: Diagrama esquemático de la implementación en PSPICE del módulo fotovoltaico con dependencia a la temperatura.

en donde $P_{\max M}$ es la potencia máxima del módulo y FF_{0M} se define con

$$FF_{0M} = \frac{v_{oc} - \ln(v_{oc} + 0,72)}{1 + v_{oc}} \quad (2.15)$$

y el factor normalizado v_{oc} se calcula con,

$$v_{oc} = \frac{V_{oc}}{N_s n V_T} \quad (2.16)$$

2.3.1. Modelo dependiente de la temperatura

Los datos proporcionados por los fabricantes de módulos fotovoltaicos se reportan en términos de:

1. valores de magnitudes eléctricas asociadas a mediciones fotovoltaicas tales como corriente de corto circuito, voltaje de circuito abierto y potencia máxima para condiciones estándar y,
2. coeficientes de temperatura

Por esta razón se implementa un modelo de comportamiento del módulo fotovoltaico basado en fuentes de voltaje y corriente que emplean los parámetros de los fabricantes en los términos mencionados anteriormente. Este modelo es capaz de reproducir el desempeño del módulo fotovoltaico bajo cualquier condición de temperatura e irradiancia.

Este modelo asume que el módulo fotovoltaico se puede representar con dos fuentes de corriente y una resistencia serie. La Figura 2.6 presenta el diagrama esquemático del módulo

fotovoltaico con dependencia de la temperatura implementado en PSPICE. Se puede observar que las dos fuentes de corriente y la resistencia serie del módulo se identifican con los nombres girrad, gidiode y R_{sM} , respectivamente. La temperatura de la celda se determina con la fuente de voltaje etcell. Los datos de entrada asociados a la temperatura ambiente y la irradiancia se introducen en los nodos 2 y 3, respectivamente.

La operación a temperatura nominal de una celda (NOCT por sus siglas en inglés) se define como la temperatura real de una celda con una irradiancia de $800W/m^2$, $20^\circ C$ de temperatura ambiente con una velocidad del viento de $1m/s$ y con la parte posterior de la celda abierta y expuesta al viento. Este parámetro relaciona la temperatura ambiente con la temperatura real de operación de la celda de la siguiente manera,

$$T_{celda} - T_a = \frac{NOCT-20}{800}G \quad (2.17)$$

en donde G es la irradiancia en W/m^2 , T_{celda} es la temperatura de la celda y T_a es la temperatura ambiente en $^\circ C$. Esta ecuación puede ser usada para transformar las características $I(V)$ usando el nuevo valor de la temperatura de la celda en las ecuaciones del módulo fotovoltaico.

Para un valor arbitrario de irradiancia y temperatura, la corriente de corto circuito del módulo esta dada por,

$$I_{scM} = \frac{I_{scMr}}{1000}G + \left(\frac{\partial I_{scM}}{\partial T}\right)(T_{cell} - T_r) \quad (2.18)$$

en donde I_{scMr} es la corriente de corto circuito del módulo, G es la irradiancia, $\frac{\partial I_{scM}}{\partial T}$ es el coeficiente de temperatura de la corriente de corto circuito del módulo, T_{cell} es la temperatura de la celda y T_r es la temperatura ambiente. La ecuación (2.18) representa la fuente de corriente “girrad” mostrada en la Figura 2.6.

La segunda fuente de corriente definida como gidiode en la Figura 2.6 se define como [11],

$$I_{gidiode} = I_{scM} \frac{\left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1\right)}{\left(e^{\frac{V_{oc}}{V_T}} - 1\right)} \quad (2.19)$$

El voltaje de circuito abierto se describe como

$$V_{ocM} \approx V_{ocMr} + \left(\frac{\partial V_{ocM}}{\partial T}\right)_G (T_{cell} - T_r) + V_T \ln \frac{I_{scM}}{I_{scMr}} \quad (2.20)$$

en donde V_{ocMr} es el voltaje de circuito abierto del módulo, $\frac{\partial V_{ocM}}{\partial T}$ es el coeficiente de temperatura del voltaje de circuito abierto y el subíndice G indica que la irradiancia es dependiente de $\frac{\partial V_{ocM}}{\partial T}$.

Por otra parte, las coordenadas de máxima potencia del módulo fotovoltaico se determinan mediante las siguientes expresiones [11],

$$I_{mM} = I_{mMr} \frac{G}{G_r} + \left(\frac{dI_{scM}}{dT} \right) (T_{cell} - T_r) \quad (2.21)$$

$$V_{mM} = N_s V_T \ln \left[1 + \frac{I_{scM} - I_{mM}}{I_{scM}} \left(e^{\frac{V_{ocM}}{N_s V_T}} - 1 \right) \right] - I_{mM} R_{sM} \quad (2.22)$$

en donde I_{mMr} es la corriente nominal del módulo y G_r es la irradiancia con un valor de 1000 W/m^2 .

El diagrama de flujo presentado en la Figura 2.7 resumen los pasos necesarios para determinar la corriente y voltaje en el punto de máxima potencia. En este diagrama de flujo se indican las ecuaciones del modelo del módulo fotovoltaico que se debe evaluar.

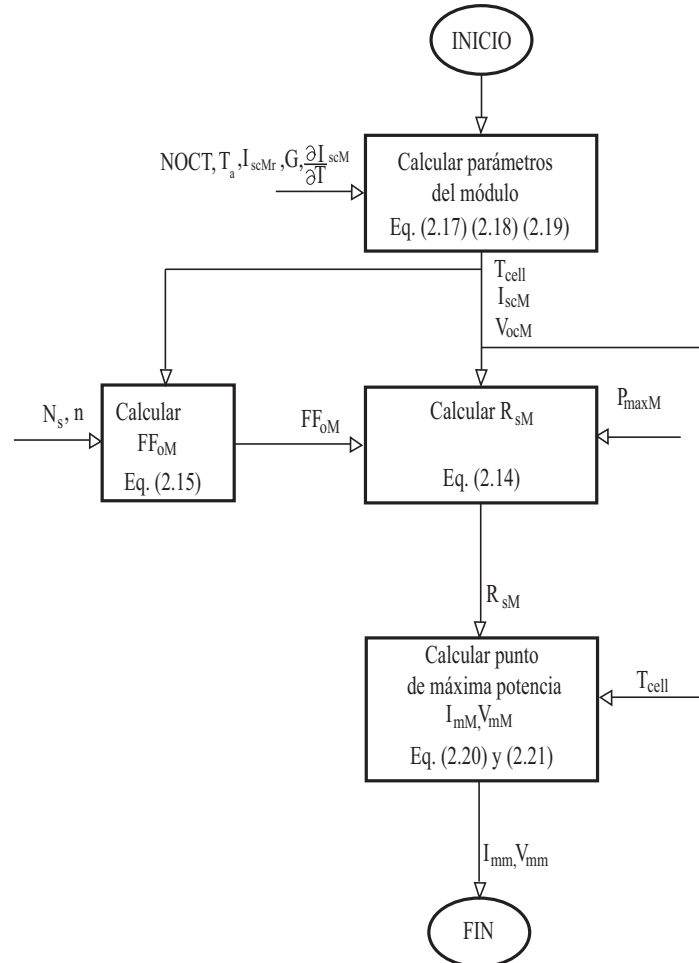


Figura 2.7: Diagrama de flujo del modelo matemático del módulo fotovoltaico.

2.4. Simulación en PSPICE

El módulo Siliken SLK60P6L se implementa en esta sección usando PSPICE con el modelado presentado previamente. La codificación del modelo del módulo fotovoltaico se presenta en el Apéndice A. Éste módulo tiene una potencia nominal de 225W y posee 60 celdas de material policristalino conectadas en serie. Las especificaciones del módulo se detallan en la Tabla 2.1. En esta tabla se presentan los datos proporcionados por el fabricante y los datos utilizados en el programa PSPICE. Se puede apreciar que el coeficiente de temperatura de corriente de corto circuito y de voltaje de circuito abierto se han modificado para ajustar la respuesta del modelo.

Tabla. 2.1: Parámetros de simulación del módulo fotovoltaico.

Parámetros eléctricos	Variable	Datos del fabricante	Datos en PSPICE
Máxima potencia P_{mp} [W]	pmaxmr	225	225
Corriente en máxima potencia I_{mp} [A]	immr	7.68	7.68
Voltaje en máxima potencia V_{mp} [V]	vmmr	29.3	29.3
Corriente de corto circuito I_{sc} [A]	iscmr	8.20	8.20
Voltaje de circuito abierto V_{oc} [V]	vocmr	36.8	36.8
NOCT [°C]	noct	49	49
Coeficiente de temperatura: $I_{sc-coef}$	coef_iscm	5.084×10^{-3}	13.5×10^{-3}
Coeficiente de temperatura: $V_{oc-coef}$	coef_vocm	-0.131008	-0.14
No. de celdas en serie	ns	60	60
No. de celdas en paralelo	np	1	1

La Figura 2.8 muestra la curva V-I proporcionada por el fabricante del panel fotovoltaico. Por su parte, la Figura 2.9 presenta los resultados de la simulación obtenida con el modelo implementado en PSPICE asumiendo una temperatura constante de 25°C y con valores de irradiancia de 200, 400, 600, 800, 1000 W/m². Para una irradiancia y temperatura ambiente determinados, la corriente y potencia de salida del arreglo son una función del voltaje en terminales, como se puede apreciar en las Figuras 2.8 y 2.9. La corriente y potencia disponibles varían en proporción de la irradiancia efectiva que incide sobre el plano del módulo fotovoltaico. Además, se puede apreciar que la característica voltaje vs. corriente del módulo fotovoltaico es no lineal. Existe un valor de voltaje para el cual se extrae la máxima potencia para un nivel de irradiancia dado. Se puede observar que los resultados obtenidos por simulación coinciden muy adecuadamente con los datos proporcionados por el fabricante. Se puede observar que los valores de corriente de corto circuito coinciden para los diferentes valores de irradiancia. Sin embargo, se puede apreciar que el voltaje de circuito abierto obtenido por simulación en PSPICE presenta un valor prácticamente constante para cualquier valor de irradiancia mientras que en la curva característica reportada por el fabricante se observa una caída de voltaje del orden de casi 4 volts cuando la irradiancia varía de 1000 W/m² a 200 W/m². Además, cabe señalar que se presentan pequeñas diferencias en la zona de la rodilla de la curva característica.

Estas diferencias se atribuyen al hecho de que el modelo del módulo fotovoltaico no considera la presencia de una resistencia en paralelo. La presencia de esta resistencia tiene el efecto de graduar la pendiente en el área de la rodilla de la curva característica.

Por su parte, las Figuras 2.10 y 2.11 presentan las curvas características reportadas por el fabricante y las obtenidas por simulación en PSPICE usando una irradiancia constante de 1000 W/m^2 y variando la temperatura usando los valores de 25, 40, 50 y 75°C . De estas figuras se puede apreciar que los resultados de la simulación en PSPICE se comparan adecuadamente con los datos reportados por el fabricante. Es evidente que tanto los valores de corriente de cortocircuito como los voltajes de circuito abierto se reproducen adecuadamente por simulación ante variaciones de temperatura. Se puede apreciar que mientras la corriente de cortocircuito aumenta, el voltaje de circuito abierto disminuye al aumentar la temperatura. Sin embargo, se pueden observar pequeñas diferencias con el modelo simulado en PSPICE ya que no se considera la resistencia en paralelo asociada a pérdidas resistivas causadas por defectos de fabricación de las celdas.

2.5. Conclusiones

En este capítulo se presentó la implementación del modelo de un módulo fotovoltaico en el paquete de simulación PSPICE. El modelo de la celda solar se basa en el circuito de un diodo ideal conectado en paralelo con una fuente de corriente que representa el efecto de la incidencia de la radiación solar sobre la celda. El modelo utilizado incorpora la característica de dependencia a la temperatura. Se presentan estudios comparativos de las curvas características del módulo fotovoltaico ante variaciones del nivel de irradiancia y temperatura. Se obtienen buenos resultados comparativos entre las simulaciones digitales y los datos proporcionados por el fabricante del módulo. Sin embargo, el modelo implementado en este trabajo no considera la resistencia en paralelo que presenta efectos de pérdidas ocasionadas por fabricación y que no son proporcionadas por el fabricante.

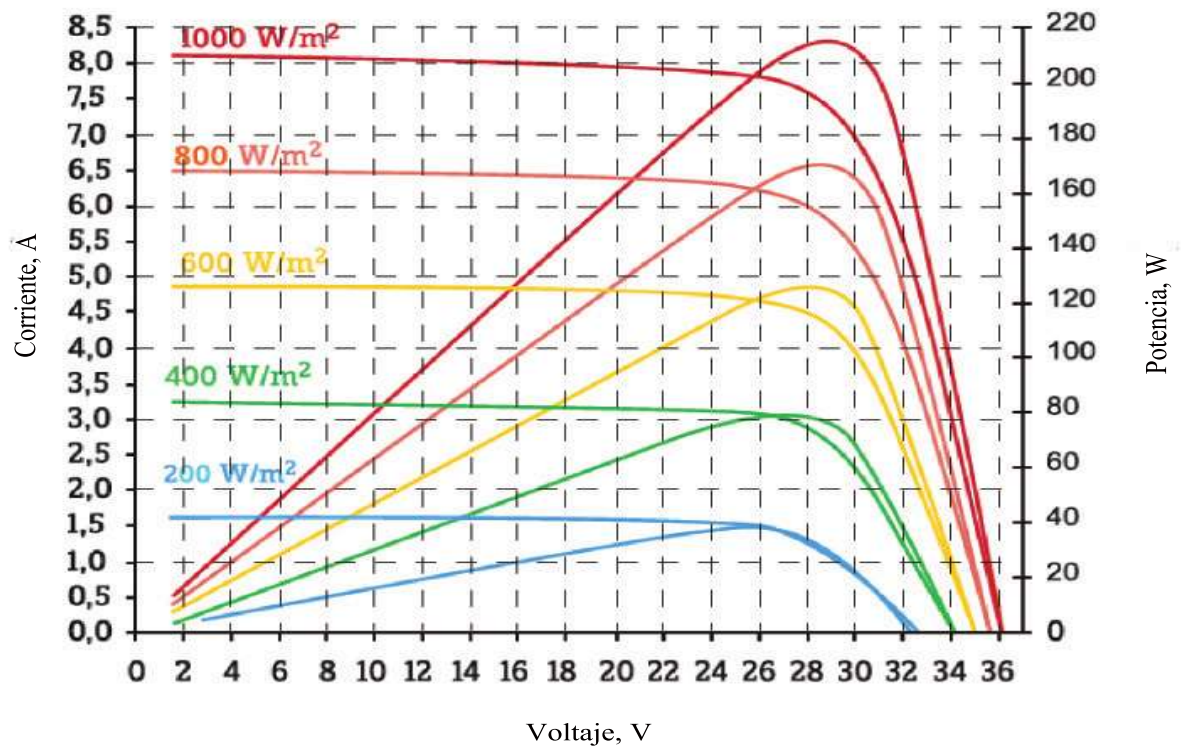


Figura 2.8: Curva característica proporcionada por el fabricante del módulo Siliken para una temperatura de 25°C y un conjunto de niveles de irradiancia.

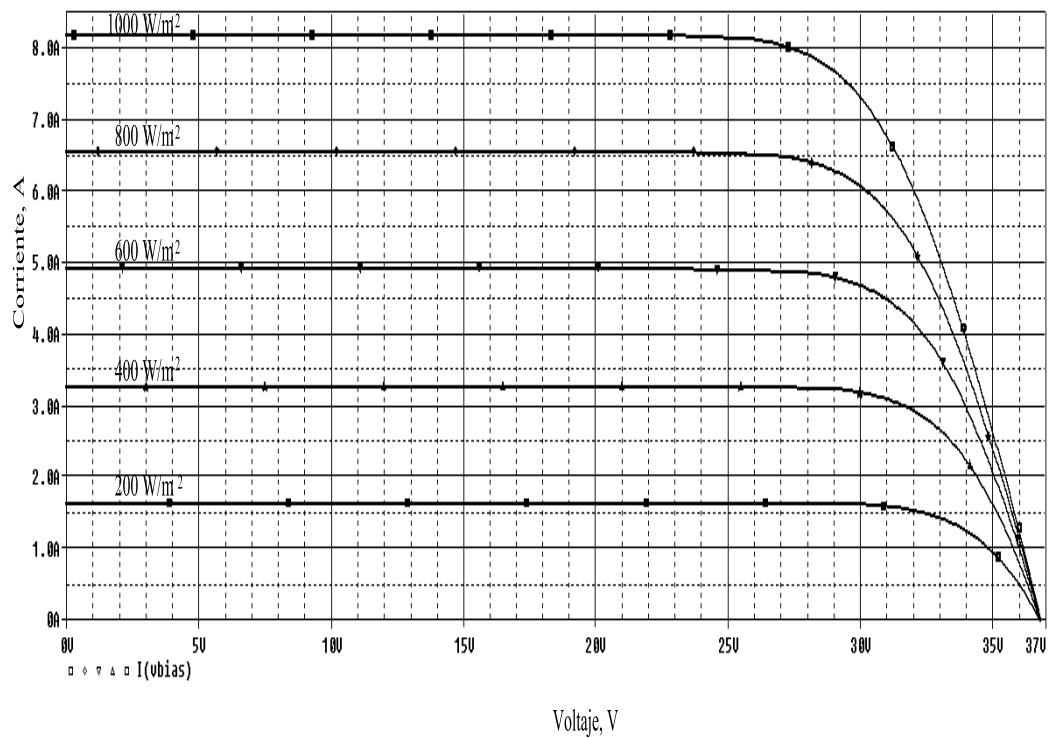


Figura 2.9: Curva característica del módulo Siliken obtenida por simulación para una temperatura de la celda de 25°C y un conjunto de niveles de irradiancia.

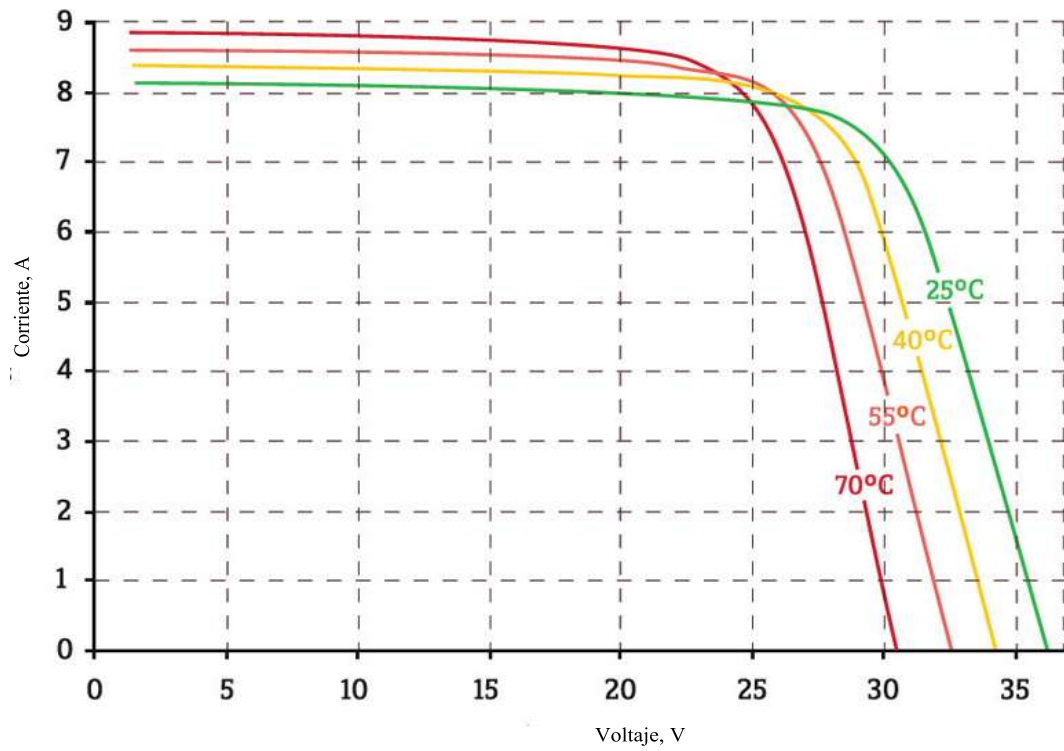


Figura 2.10: Curva característica del fabricante del módulo Siliken para una irradiancia constante de 1000 W/m^2 y $T_{\text{celda}} = \{25, 40, 55, 70\}$.

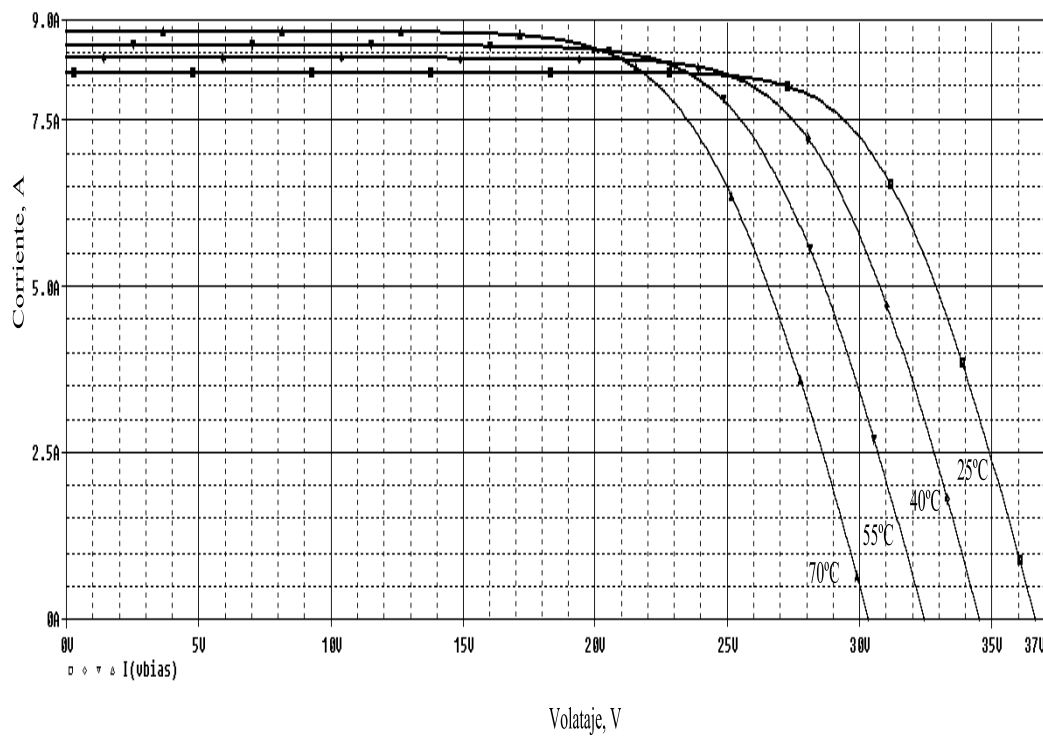


Figura 2.11: Curva característica del módulo Siliken obtenida por la simulación para una irradiancia constante de 1000 W/m^2 y $T_{\text{celda}} = \{25, 40, 55, 70\}$.

Capítulo 3

MODELADO DE UN GENERADOR FOTOVOLTAICO

Los sistemas fotovoltaicos son modulares y se pueden diseñar para una gran variedad de aplicaciones desde pequeños sistemas residenciales hasta grandes plantas de generación conectadas a los niveles de transmisión. Los sistemas residenciales y comerciales conectados en los niveles de distribución se conectan del lado del usuario en el punto de medición. Los sistemas residenciales típicos poseen una capacidad menor de 10 KW y un inversor monofásico, mientras que los sistemas comerciales pueden alcanzar varios MW usando múltiples inversores. En estas configuraciones la potencia se inyecta normalmente con un factor de potencia unitaria.

3.1. Introducción

Un generador fotovoltaico es un dispositivo que convierte la energía en la forma de radiación solar a energía en la forma de una corriente eléctrica. El componente básico de un sistema fotovoltaico es la celda fotovoltaica. Múltiples celdas conectadas en serie y en paralelo forman módulos fotovoltaicos, los cuales se venden comercialmente para aplicaciones tales como generación fotovoltaica acoplada a la red eléctrica. Los módulos fotovoltaicos se conectan a su vez en serie y paralelo con el objetivo de crear un arreglo fotovoltaico. Estos arreglos poseen una potencia de CD, la cual se debe acondicionar con un sistema de seguimiento del punto de máxima potencia (SPMP) y un convertidor inversor. Estas dos funciones las realiza la unidad de acondicionamiento de potencia, la cual contiene el SPMP y el inversor.

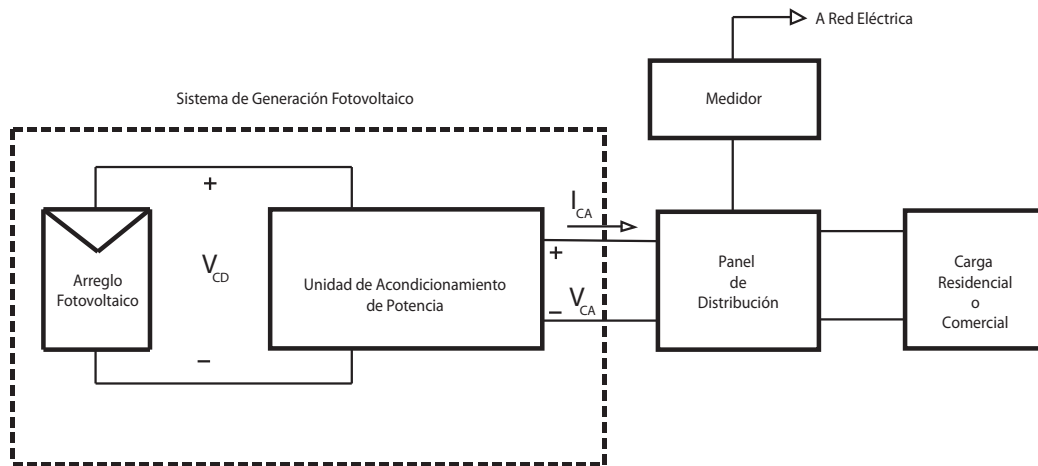


Figura 3.1: Esquema de conexión típico de un generador fotovoltaico residencial o comercial.

La Figura 3.1 presenta el diagrama unifilar del generador fotovoltaico conectado a la red eléctrica. Los elementos principales del generador son el arreglo de paneles fotovoltaicos, un convertidor inversor monofásico y la red eléctrica. En las siguientes secciones se presentará el modelo matemático del arreglo de paneles fotovoltaicos y el inversor de electrónica de potencia.

El modelo de un generador fotovoltaico se basa en el circuito equivalente del modelo de un módulo, siendo este módulo la unidad básica para desarrollar las ecuaciones características del generador. El modelo que se presenta en esta sección del generador fotovoltaico, consta de dos grupos de módulos fotovoltaicos conectados en paralelo, en donde cada grupo está constituido por nueve módulos fotovoltaicos conectados en serie.

3.2. Arreglo fotovoltaico

La conexión de paneles fotovoltaicos en serie y paralelo permite desarrollar un modelo de un generador fotovoltaico para diferentes aplicaciones que requieren distintos niveles de potencia. En el caso más general un generador fotovoltaico está constituido de varios módulos fotovoltaicos conectados en un arreglo de dimensión $N_{sG} \times N_{pG}$. Se emplean reglas de escalamiento para relacionar las características de un módulo fotovoltaico individual con un generador fotovoltaico.

El procedimiento descrito en el capítulo anterior para escalar una celda a un panel fotovoltaico pueden ser usados aquí para extender el proceso de escalamiento a un generador fotovoltaico. Considérese que la unidad mínima en un generador es un módulo fotovoltaico, con los siguientes parámetros:

- corriente de corto circuito del módulo I_{scM}

- voltaje de circuito abierto del módulo V_{ocM}
- máxima potencia del módulo P_{maxM}
- corriente en el punto máximo de potencia del módulo I_{mM}
- voltaje en el punto máximo de potencia del módulo V_{mM}
- coeficientes de temperatura del módulo fotovoltaico para la corriente de corto circuito y el voltaje de circuito abierto $\frac{\partial I_{scM}}{\partial T}$ y $\frac{\partial V_{ocM}}{\partial T}$ respectivamente.

Para formar un arreglo de N_{sG} módulos en serie y N_{pG} en paralelo, la corriente y voltaje del generador se escala con,

$$I_G = N_{pG} I_M \quad (3.1)$$

$$V_G = N_{sG} V_M \quad (3.2)$$

en donde los subíndices G se refieren al generador y M al módulo fotovoltaico. Aplicando estas reglas de escalamiento, entonces la corriente en el generador se define como,

$$I_G = N_{pG} I_{scM} - \frac{N_{pG} I_{scM}}{e^{\frac{V_{ocM}}{N_s V_T}}} \left(e^{\frac{V_G + I_G R_{sM} \frac{N_{sG}}{N_{pG}}}{n N_s N_{sG} V_T}} - 1 \right) \quad (3.3)$$

Por su parte, la resistencia en serie del generador se determina al igual que la resistencia R_{sM} utilizando la siguiente regla de escalamiento,

$$R_{sG} = \frac{N_{sG}}{N_{pG}} R_{sM} \quad (3.4)$$

3.3. Unidad de acondicionamiento de potencia

La unidad de acondicionamiento de potencia es un dispositivo que acopla el arreglo fotovoltaico con la red eléctrica. Los componentes principales que integran esta unidad de acondicionamiento es el seguidor del punto máximo de potencia (SPMP) y el inversor (ver Fig 3.2)

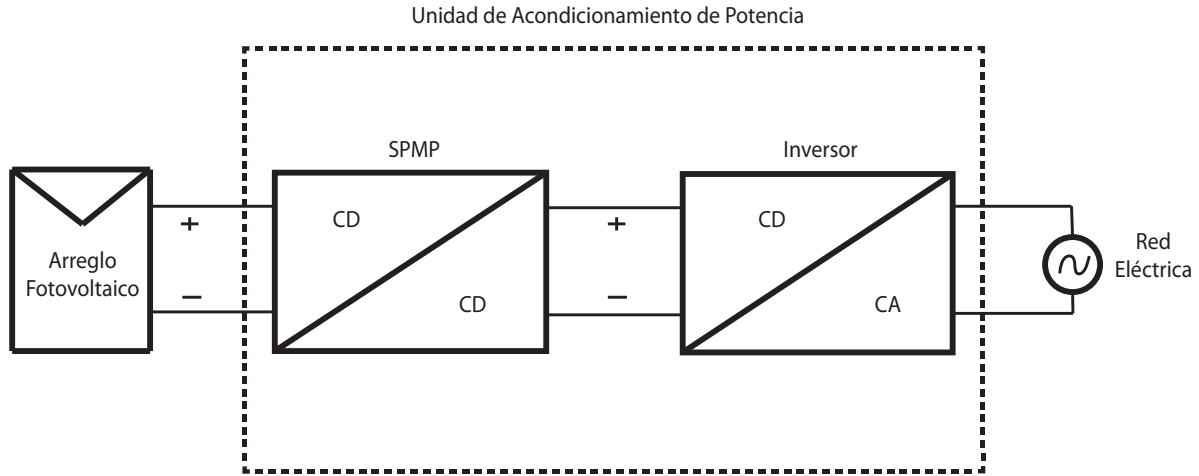


Figura 3.2: Componentes de la unidad de acondicionamiento de potencia.

3.3.1. Punto de Máxima Potencia

En un sistema fotovoltaico la información acerca de la evolución del punto máximo de potencia durante un periodo de tiempo es importante porque los convertidores electrónicos lo usan para conectar el dispositivo fotovoltaico a las cargas. Para calcular este punto máximo se necesitan las coordenadas I_{mr} y V_{mr} en condiciones estándares. Estos valores se encuentran en los datos de especificaciones del fabricante. Para casos en condiciones de valores arbitrarios de irradiancia y temperatura, la corriente puede ser calculada en el punto máximo de potencia considerando un escalamiento proporcional con la irradiancia y tomando en cuenta el coeficiente de temperatura de la corriente de corto circuito. A partir de (2.20) y (2.21) se hace un escalamiento para obtener la corriente del punto máximo de potencia de la siguiente manera,

$$I_{mG} = N_{pG} \left[I_{mMr} \frac{G}{G_r} + \left(\frac{dI_{scM}}{dT} \right) (T_{cell} - T_r) \right] \quad (3.5)$$

y

$$V_{mG} = N_{sG} \left[N_s V_T \ln \left(1 + \frac{I_{scM} - I_{mM}}{I_{scM}} \left(e^{\frac{V_{ocM}}{N_s V_T}} - 1 \right) \right) - I_{mM} R_{sM} \right] \quad (3.6)$$

en donde V_{ocM} se define por la Ecuación (2.8).

Usando las Ecuaciones (3.1) a (3.4) se puede codificar un modelo en PSPICE de un generador fotovoltaico.

3.4. Modelo del inversor

La principal función de un inversor es convertir la fuente de voltaje de DC obtenida del generador fotovoltaico en una forma de onda de CA. Esquemáticamente los inversores son representados como se muestra en la Figura 3.3, en donde las magnitudes de la entrada y salida son definidas como I_{CD}, V_{CD} e I_{CA}, V_{CA} respectivamente.

La eficiencia del inversor se define como la relación del valor RMS de la potencia de salida de CA respecto de la potencia RMS de entrada de CD,

$$\eta = \frac{P_{CA}}{P_{CD}} = \frac{V_{CA}I_{CA}}{V_{CD}I_{CD}} \quad (3.7)$$

A pesar que la eficiencia de los inversores no es constante, en este trabajo se considera constante debido a que este parámetro permanece relativamente invariable para un amplio rango de potencias de salida.

El modelo del inversor implementado en este trabajo, se considera similar a una fuente de corriente ideal, con la componente de CD y los armónicos iguales a cero. Por lo tanto, de (3.9) se tiene que la corriente de salida del inversor está dada por,

$$I_{CA} = \eta \frac{V_{CD}I_{CD}}{V_{CA}} \quad (3.8)$$

y el valor pico de la corriente de salida del inversor es,

$$\hat{I}_{CA} = \sqrt{2}\eta \frac{V_{CD}I_{CD}}{V_{CA}} \quad (3.9)$$

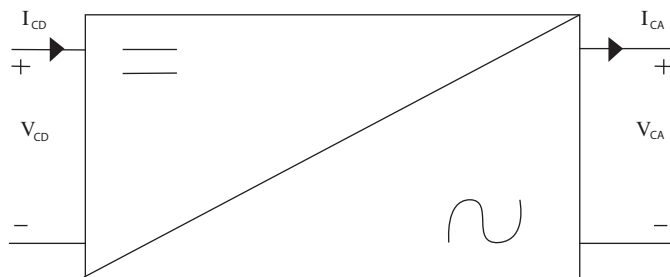


Figura 3.3: Representación esquemática de un inversor.

La Figura 3.4 muestra la implementación en PSPICE del modelo del inversor monofásico para conexión a la red eléctrica. El rastreo del punto máximo de potencia es una característica incluida normalmente en los inversores para obtener la potencia máxima del arreglo fotovoltaico. El modelo mostrado en la Figura 3.4 incluye dicha característica. Como se puede observar en el modelo de la Figura 3.4, el inversor tiene tres nodos de entrada, los cuales son los valores de las coordenadas del punto máximo de potencia del generador fotovoltaico (nodos 5 y 6) y en voltaje en terminales del inversor (nodo 1). Las entradas 5 y 6 del inversor se conectan a las resistencias R_5 y R_6 .

El punto de operación se ajusta al punto máximo de potencia mediante la conexión de una fuente de voltaje dependiente “empp” en el nodo 1. Esta fuente de voltaje dependiente toma el valor del voltaje en el punto de máxima potencia indicado en el nodo de entrada 6.

La fuente de voltaje controlado “eVc2” determina la amplitud de la corriente senoidal de salida utilizando la Ecuación (3.11) y asumiendo $V_{AC} = 220$ V. El valor de la amplitud de la fuente eVc2 es usada en la fuente de corriente dependiente “giout”, la cual tiene una frecuencia de 60 Hz de frecuencia, alimentado por la fuente de voltaje v2. Finalmente, la fuente de corriente dependiente “giout” determina la corriente en el nodo 4 de salida del inversor, como se puede ver en la Figura 3.4.

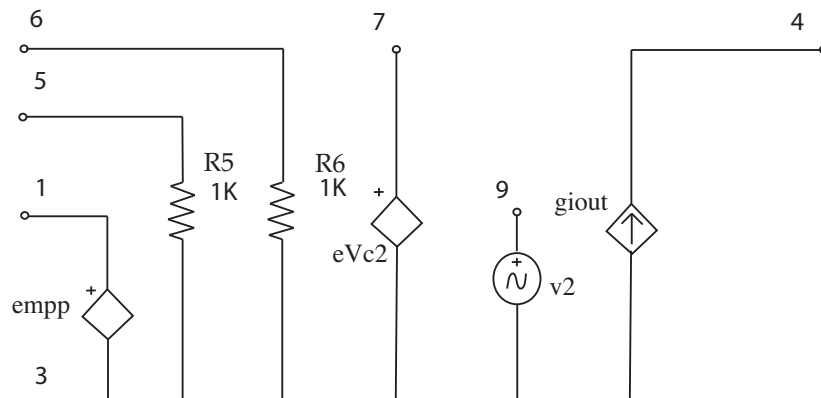


Figura 3.4: Implementación en PSPICE del modelo del inversor.

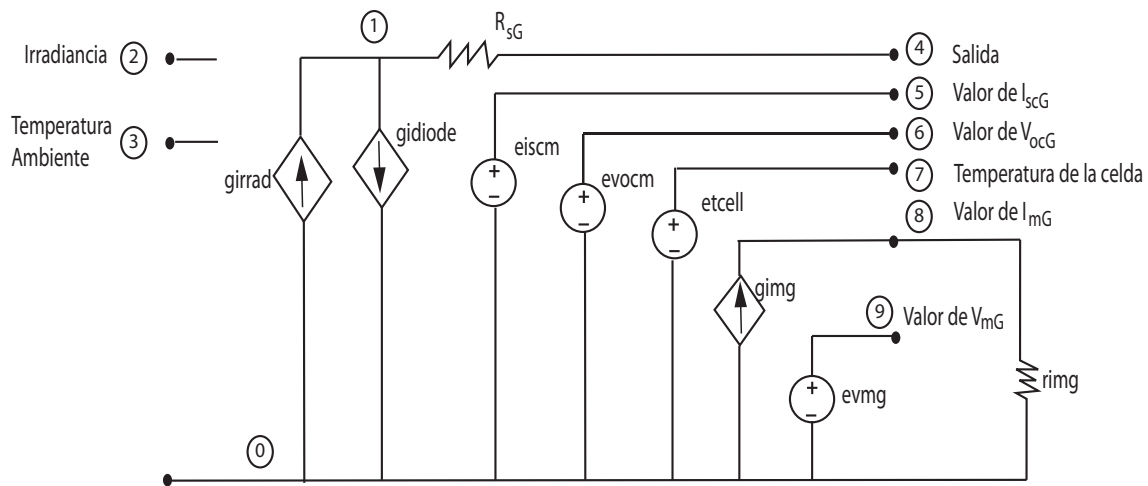


Figura 3.5: Circuito equivalente del generador fotovoltaico en PSPICE.

La Figura 3.5 presenta la implementación en PSPICE de dicho generador, la cual es muy similar al modelo del módulo fotovoltaico. En el modelo se involucra la Ecuación (3.6) que determina la corriente nominal del generador representada por una fuente de corriente “gimg”. La fuente de voltaje “evmg” utiliza la Ecuación (3.7) para determinar el voltaje nominal del generador. La Ecuación (3.4) determina la resistencia serie del generador R_{sG} siendo un elemento conectado al nodo de salida.

3.5. Caso de estudio

En esta sección se presenta la simulación de un generador fotovoltaico en PSPICE. Primeramente, se reportan los resultados de simulación que se obtienen al variar los niveles de irradiancia y en una segunda simulación se presenta el efecto de la variación de temperatura. El arreglo del generador está constituido por nueve paneles conectados en serie los cuales forman dos grupos conectados en paralelo. El generador tiene una potencia nominal de 4050 W, una corriente nominal de 15.36 A y un voltaje nominal de 263.7 V. En la Tabla 3.1 se presenta las características del generador.

Tabla. 3.1: Parámetros del módulo y generador fotovoltaico.

Parámetro	Módulo	Generador
Máxima potencia P_{mp} [W]	225	4050
Corriente en máxima potencia I_{mp} [A]	7.68	15.36
Voltaje en máxima potencia V_{mp} [V]	29.3	263.7
Corriente de corto circuito I_{sc} [A]	8.20	16.4
Voltaje de circuito abierto V_{oc} [V]	36.8	331.2
Coefficiente de temperatura: I_{sc_coef}	13.5×10^{-13}	13.5×10^{-13}
Coefficiente de temperatura: V_{oc_coef}	-0.14	-0.14

En la Figura 3.6 se muestra el resultado de simulación del generador en condiciones de distintos valores de irradiancia. Se puede apreciar que los valores de corriente y voltaje permanecen en el rango de los valores nominales calculados mostrados en la Tabla 3.1. También se observa, que la corriente llega hasta 16.4 A cuando la irradiancia es de 1000 W/m^2 y ante la mínima irradiancia de 200 W/m^2 la corriente disminuye hasta 3.2 A aproximadamente. Sin embargo, el voltaje de circuito abierto permanece constante ante las distintas variaciones de irradiancia que se presentan. Por su parte, en la Figura 3.7 se aprecia la característica I-V en condiciones de variación de temperatura ambiente, para obtener la temperatura de operación que se muestra en cada curva para una irradiancia constante de 1000 W/m^2 . Se puede apreciar que ante una temperatura de operación de 70°C la corriente aumenta hasta llegar a 18.593 A y el voltaje de circuito abierto disminuye hasta 274.363 V. Para una temperatura de 25°C el voltaje alcanza el valor nominal de 331.2 V y la corriente alcanza 16.4 A, cumpliendo así los valores estimados en los cálculos mostrados en la Tabla 3.1.

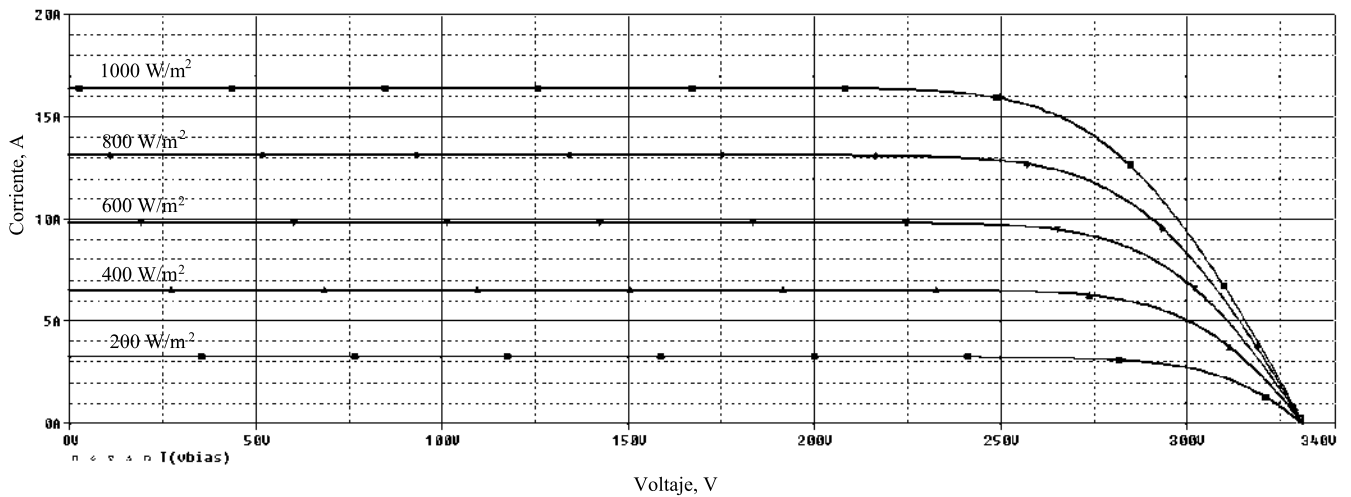


Figura 3.6: Operación del generador para distintos valores de irradiancia con temperatura de la celda de 25°C .

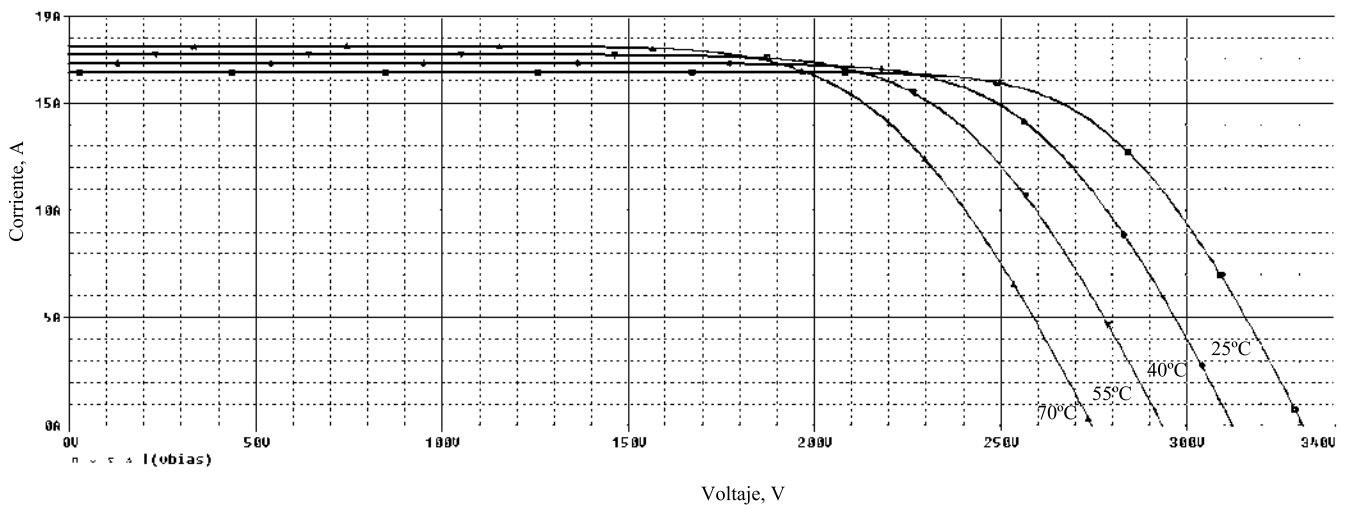


Figura 3.7: Operación del generador para distintos valores de temperatura ambiente con irradiancia constante de 1000 W/m^2 .

3.6. Conclusiones

En este capítulo se implementa un modelo de un generador fotovoltaico en PSPICE, el cual corresponde a uno de los tres circuitos de 4 KW que constituyen el generador fotovoltaico de 12 KW. Los resultados de simulaciones muestran las curvas de voltaje y corriente para distintas condiciones de irradiancia y temperatura. Se puede apreciar que para valores arbitrarios de irradiancia, la corriente es proporcional a la irradiancia y en cambio el voltaje de circuito abierto permanece constante. Por su parte, cuando el arreglo fotovoltaico se somete ante distintas variaciones de temperatura de operación de las celdas, ocasiona que el voltaje de circuito abierto tienda a variar. Siendo el voltaje de circuito abierto inversamente proporcional a la temperatura de operación de las celdas fotovoltaicas. Por su parte, la corriente de corto circuito es proporcional a los cambios de temperatura de operación de las celdas fotovoltaicas.

Capítulo 4

CASOS DE ESTUDIO

Un sistema fotovoltaico conectado a la red es un tipo de instalación en donde tres elementos intervienen: el generador fotovoltaico, el inversor y un circuito equivalente del sistema eléctrico. El modelo que se presenta en este capítulo del sistema fotovoltaico conectado a la red consiste en un arreglo de 9 x 2 módulos y un convertidor inversor monofásico por fase conectado a la red eléctrica. La Figura 4.1 muestra los componentes del sistema fotovoltaico, en donde se observan los nodos de conexión entre cada componente. La irradiancia y temperatura que inciden sobre el generador son introducidas a través de los nodos 1 y 43, respectivamente. La función del convertidor inversor CD/CA es adecuar la energía producida por el generador fotovoltaico a las características específicas de la red eléctrica. En ausencia de irradiancia la corriente de corto circuito del módulo fotovoltaico I_{sc} tiende a ser cero. Bajo esta circunstancia, el generador actúa como una carga adicional a la red. Este efecto es impedido por la conexión de un diodo de bloqueo entre la salida del generador y la entrada del inversor. La red eléctrica se modela como un bus infinito y una carga conectada en paralelo con el bus infinito[11] (ver Fig. 4.1).

El código del programa en PSPICE del sistema de generación fotovoltaico se ilustra en el Apéndice B. El modelo del generador fotovoltaico ha sido implementado usando el modelo descrito en el Capítulo 3. El modelo de la red eléctrica ha sido incluida como un subcircuito llamado “red_CFE.cir” y se considera un perfil de irradiancia dado en el archivo “irradiancia.stl”. En las simulaciones realizadas se consideraron los mismos parámetros empleados por el modelo en PSPICE del módulo fotovoltaico descrito en el Capítulo 2.

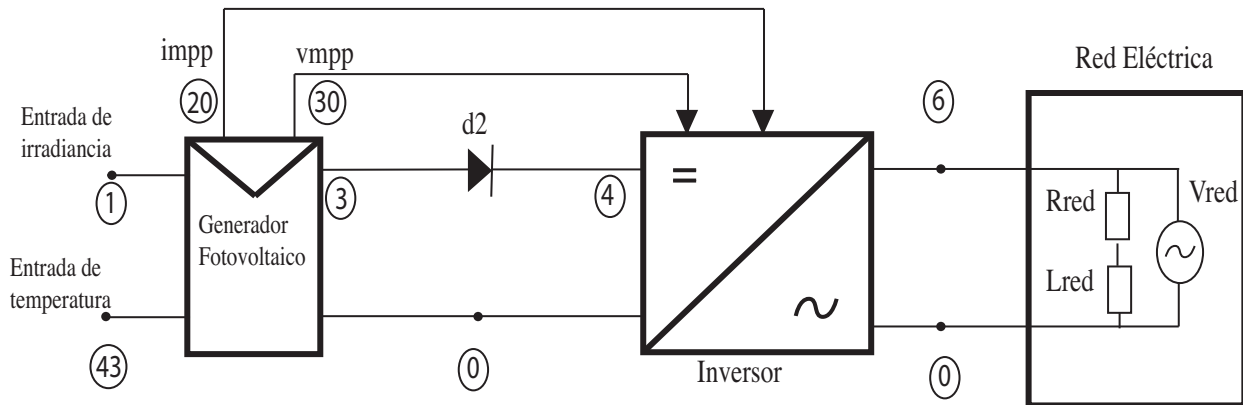
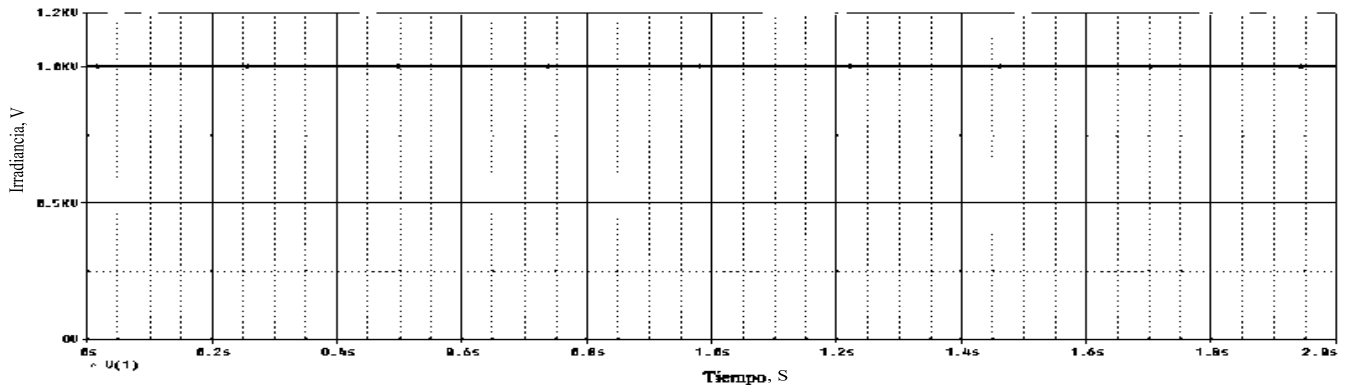


Figura 4.1: Diagrama de bloques del sistema fotovoltaico.

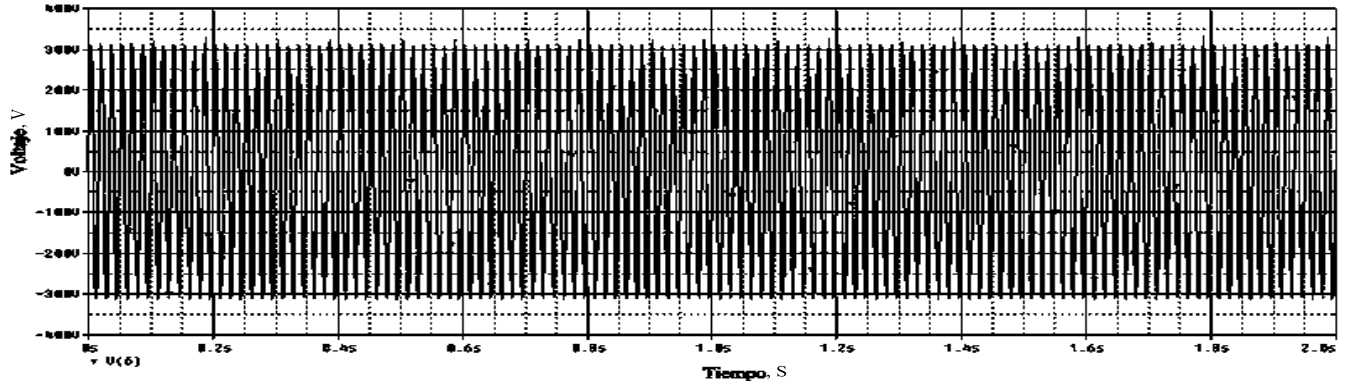
4.1. Caso de Estudio 1: Operación con irradiancia constante

La Figura 4.2 muestra los resultados de simulación del sistema fotovoltaico bajo condiciones de operación con irradiancia de 1000 W/m^2 y una temperatura ambiente constante de 25°C . El tiempo de simulación especificado es de dos segundos. En las gráficas mostradas en la Figura 4.2 el eje de las abscisas representa el tiempo en segundos y el eje de las ordenadas muestra el valor del voltaje, corriente o potencia. La Figura 4.2 (a) indica el nivel de irradiancia usado en las simulaciones. Debido a que la irradiancia se simula como una fuente de voltaje, entonces las unidades que se indican en el eje vertical de la Figura 4.2 (a) se encuentra en volts. En la Figura 4.2 (b) se muestra el voltaje instantáneo en la salida del inversor, en donde se puede apreciar que la forma de onda alcanza un valor pico de 309.711 V y se mantiene constante en el transcurso del tiempo. En la Figura 4.2 (c) se muestra la forma de onda senoidal que representa la corriente instantánea en la salida del inversor cuya amplitud permanece constante en el tiempo alcanzando un valor máximo de 20.263 A . En la Figura 4.2 (d) se aprecia la potencia instantánea en donde se hace notar un valor constante de amplitud de 6.3412 KW . Además la potencia instantánea de salida oscila entre 0 y 6.3412 KW con una frecuencia de 120 Hz .

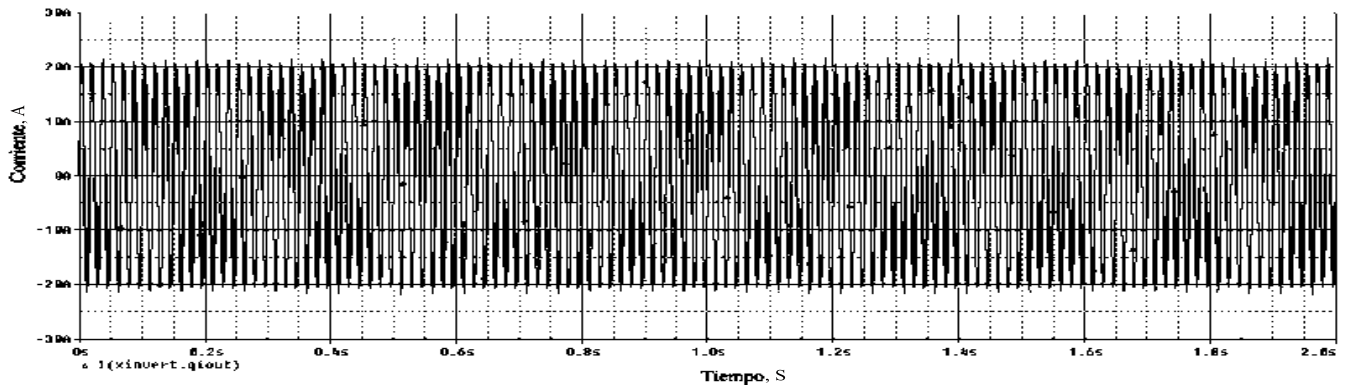
Por su parte, la Figura 4.3 muestra los valores eficaces correspondientes para las variables reportadas previamente en la Figura 4.2. En la Figura 4.3 (b) se reporta el voltaje RMS en terminales del inversor, el cual alcanza un valor de máximo de 219.907 V . En la Figura 4.3 (c) se observa que la corriente en la salida del inversor alcanza un valor de 14.404 A , mientras que en la Figura 4.3 (d) se aprecia la potencia de salida del inversor alcanza un valor de 3167.6 W .



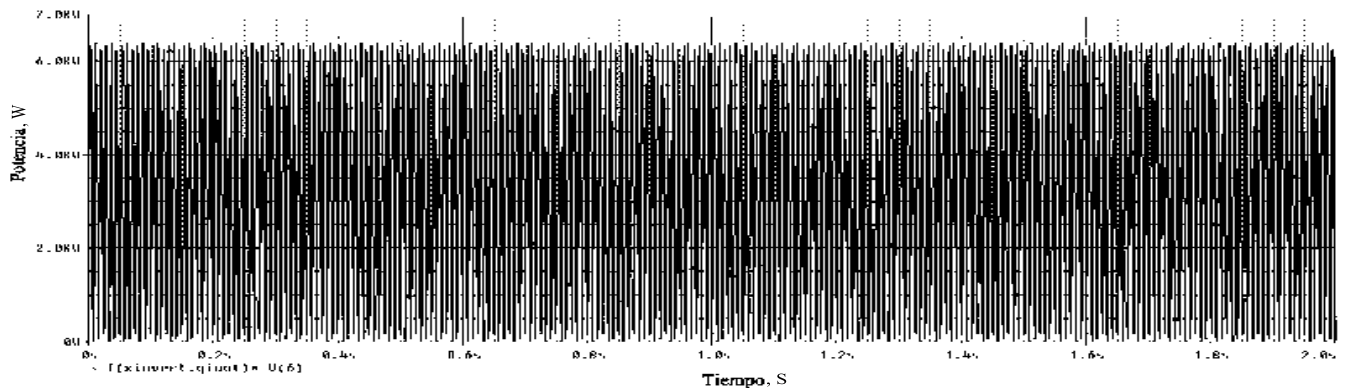
(a)



(b)

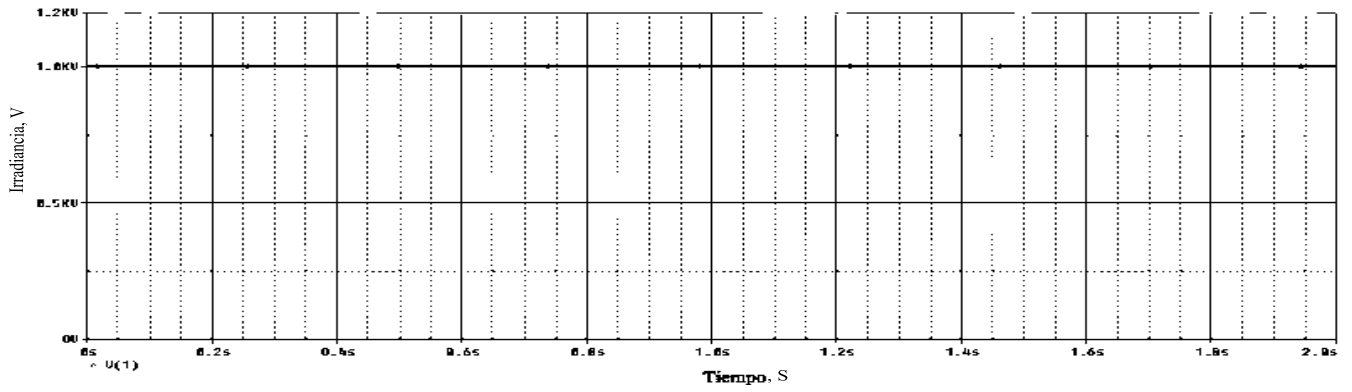


(c)

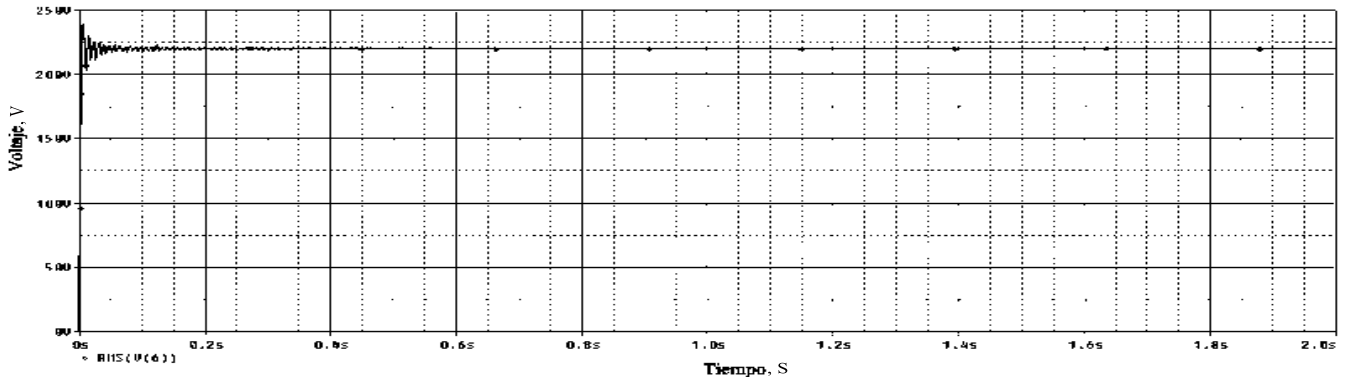


(d)

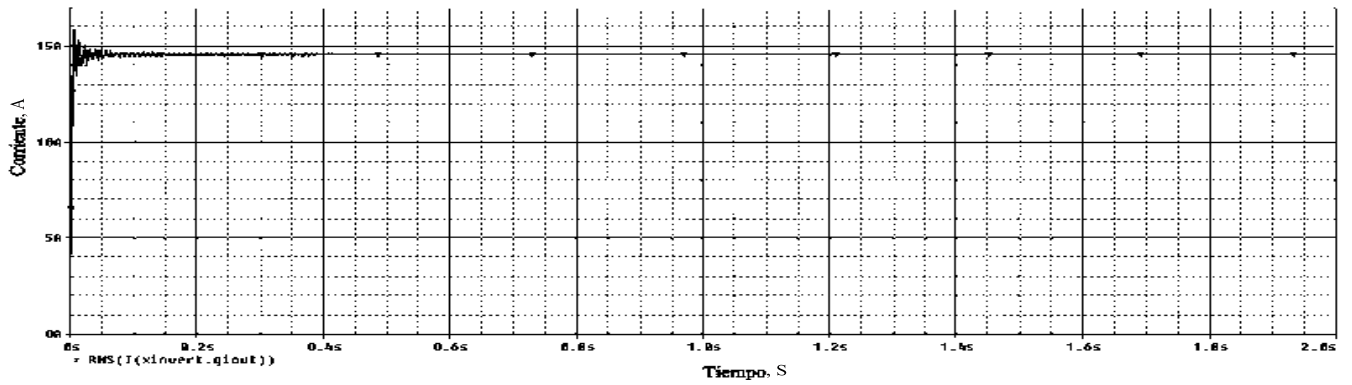
Figura 4.2: Operación del generador fotovoltaico con un nivel de irradiancia constante de 1000 W/m^2 : a) Nivel de irradiancia. b) Voltaje instantáneo en la salida del inversor. c) Corriente instantánea en la salida del inversor y d) Potencia instantánea que se inyecta a la red eléctrica.



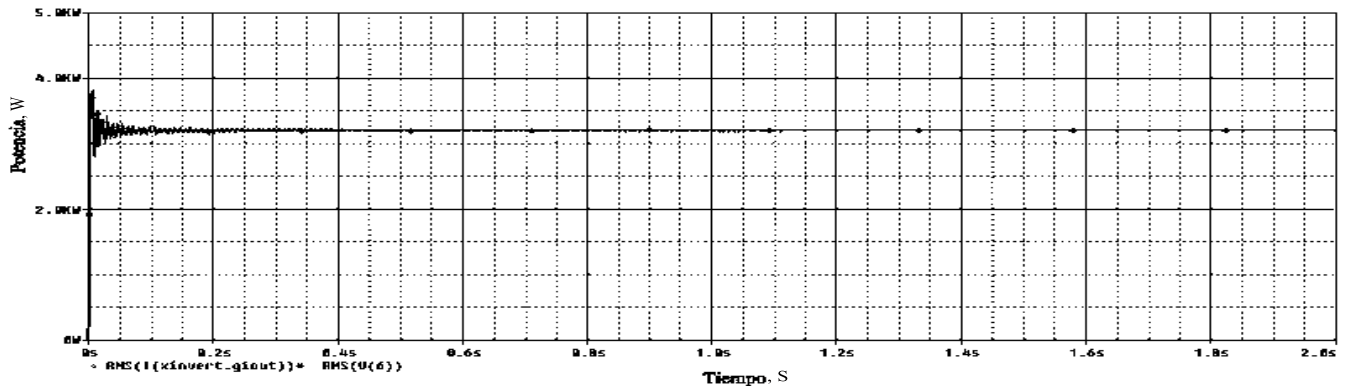
(a)



(b)



(c)



(d)

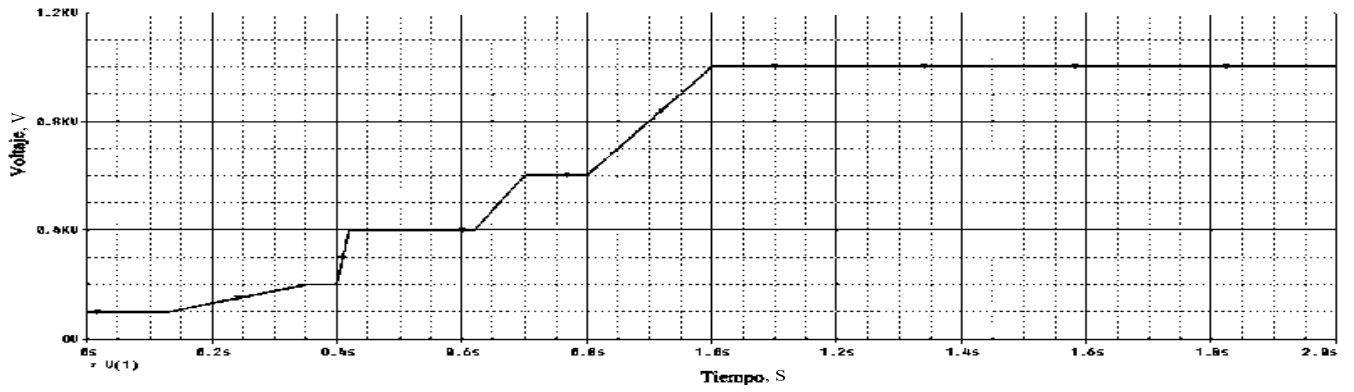
Figura 4.3: Valores eficaces del generador fotovoltaico: a) Irradiancia. b) Voltaje RMS en la salida del inversor. c) Corriente RMS en la salida del invero y d) Potencia RMS inyectada a la red eléctrica.

4.2. Caso de Estudio 2: Operación con irradiancia variable

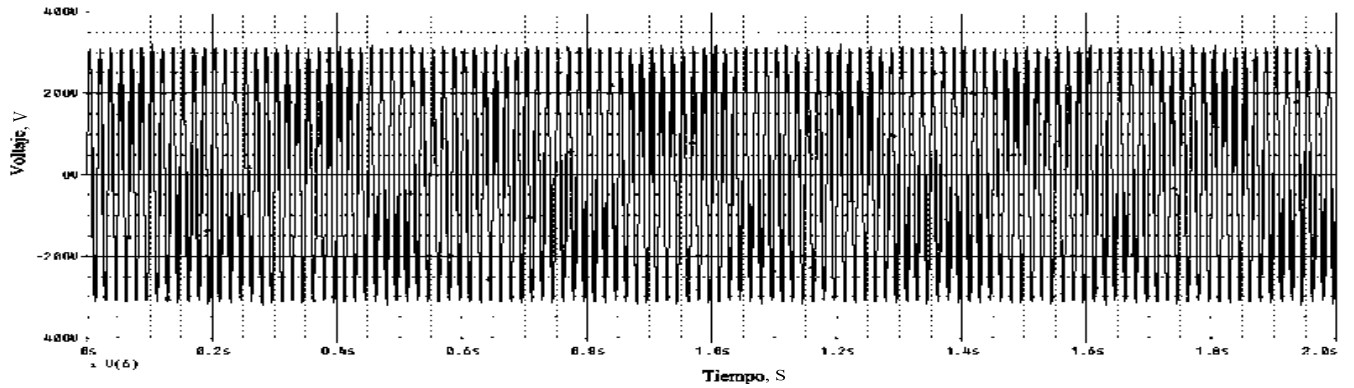
Las variaciones de la irradiancia se reflejan en la potencia de salida de la instalación fotovoltaica. Aunado a los ciclos de variación predecibles diarios y estacionales, la variación de la irradiancia de corta duración también ocurre como resultado por sombras ocasionadas por nubes moviéndose sobre el arreglo fotovoltaico. Además, la variabilidad de la irradiancia se ve afectada por factores tales como la característica de la nube, el tamaño de la instalación fotovoltaica, el método de seguimiento incorporado al sistema de control y la separación física entre los módulos fotovoltaicos del sistema de generación fotovoltaico.

En este caso de estudio se analiza la operación del generador fotovoltaico ante una entrada que representa diferentes niveles de irradiancia. En este estudio la irradiancia varía de 100 a 1000W/m², mientras que la temperatura ambiente se mantiene en 25°C. En la Figura 4.4 (a) se muestra los cambios de irradiancia en el tiempo. De la Figura 4.4 (b) se puede observar que el voltaje de salida del inversor se mantiene constante aún ante las variaciones de irradiancia. Por otra parte, en la Figura 4.4 (c) se aprecia que la corriente instantánea, es proporcional a la variación de la irradiancia. La potencia instantánea de salida del generador fotovoltaico se muestra en la Figura 4.4 (d). Se puede apreciar que la potencia sigue el mismo patrón ascendente de la irradiancia, es decir, la potencia de salida aumenta proporcionalmente con la irradiancia.

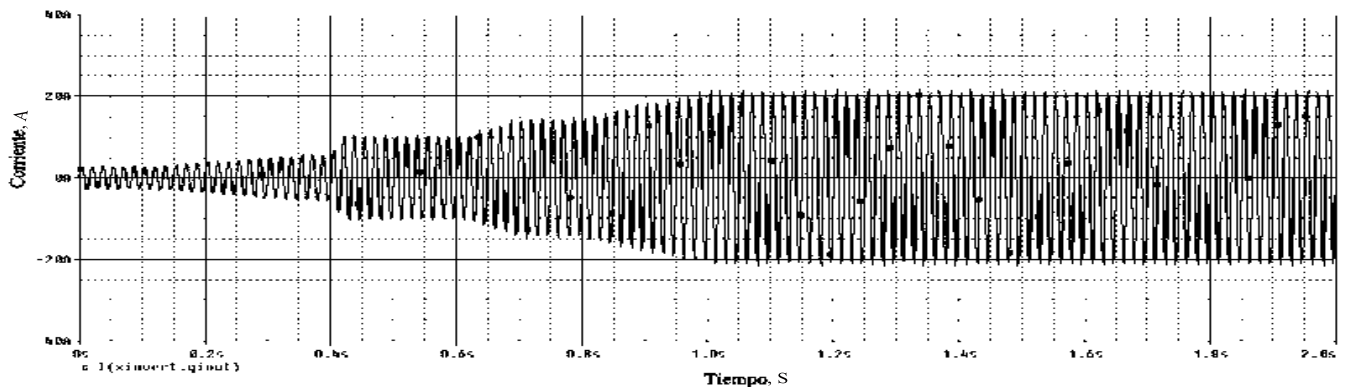
La Figura 4.5 muestra los valores eficaces del voltaje, corriente y potencia de salida para la operación del generador fotovoltaico ante cambios de irradiancia. En la Figura 4.5 (b) se observa claramente que el valor RMS del voltaje se mantiene constante ante variaciones de la irradiancia, alcanzando un valor máximo de 219.888 V. En cambio la corriente muestra una alta dependencia a las variaciones de la irradiancia como se puede apreciar en la Figura 4.5 (c). Finalmente, en la Figura 4.5 (d) se muestra el comportamiento de la potencia de salida conforme se incrementa la irradiancia hasta alcanzar un valor de aproximadamente 2.6 KW.



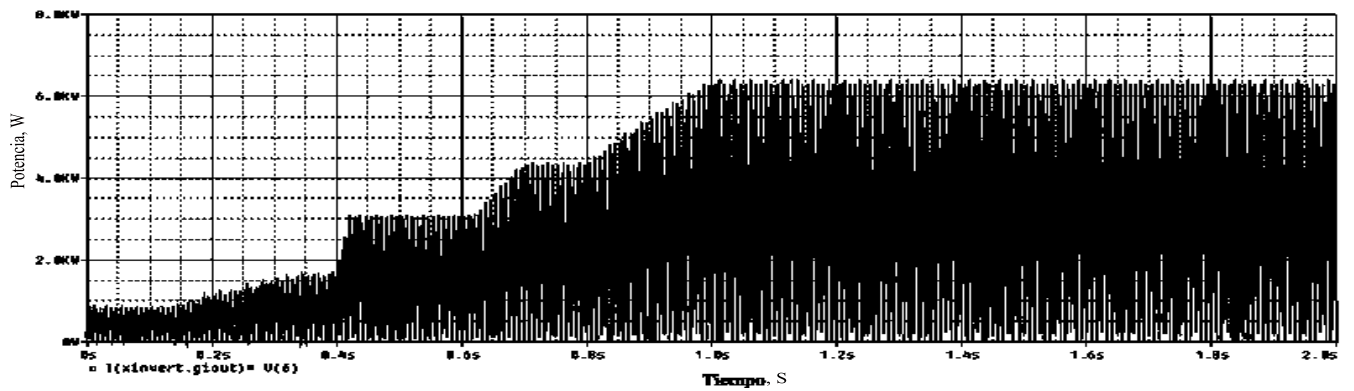
(a)



(b)

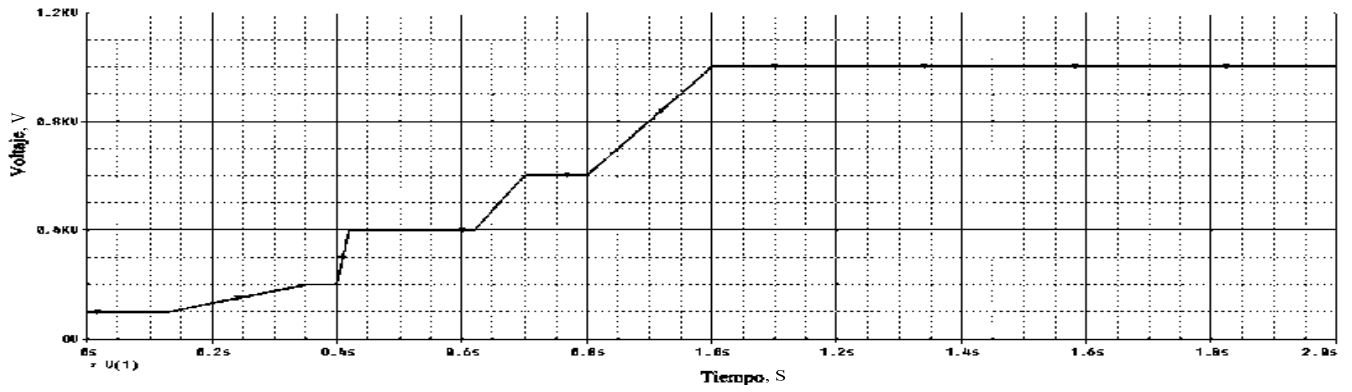


(c)

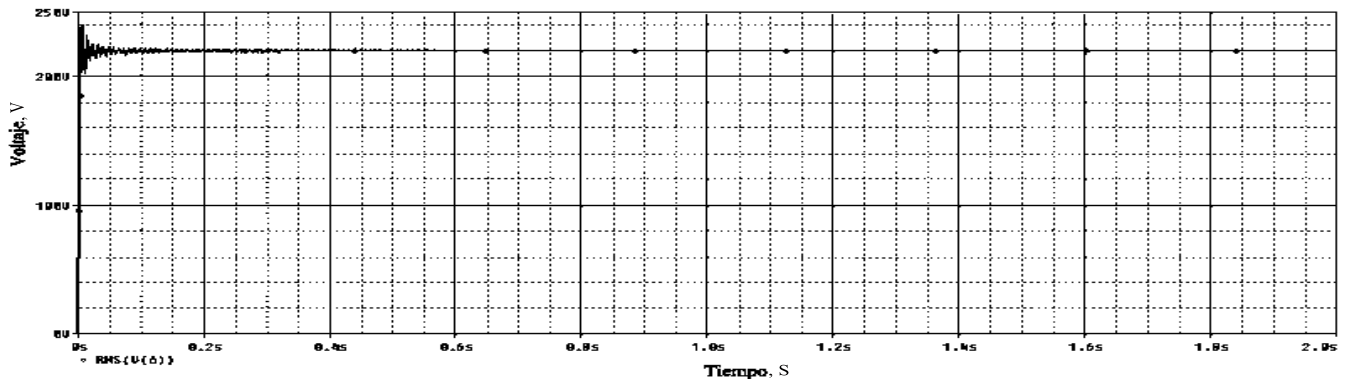


(d)

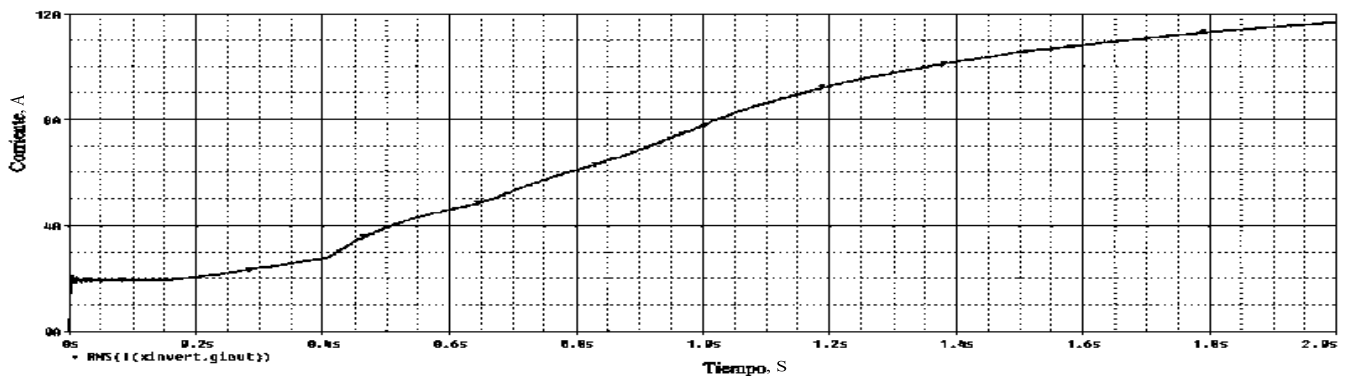
Figura 4.4: Operación del generador fotovoltaico para un nivel de irradiancia variable: a) Nivel de irradiancia. b) Voltaje de salida. c) Corriente de salida y d) Potencia instantánea.



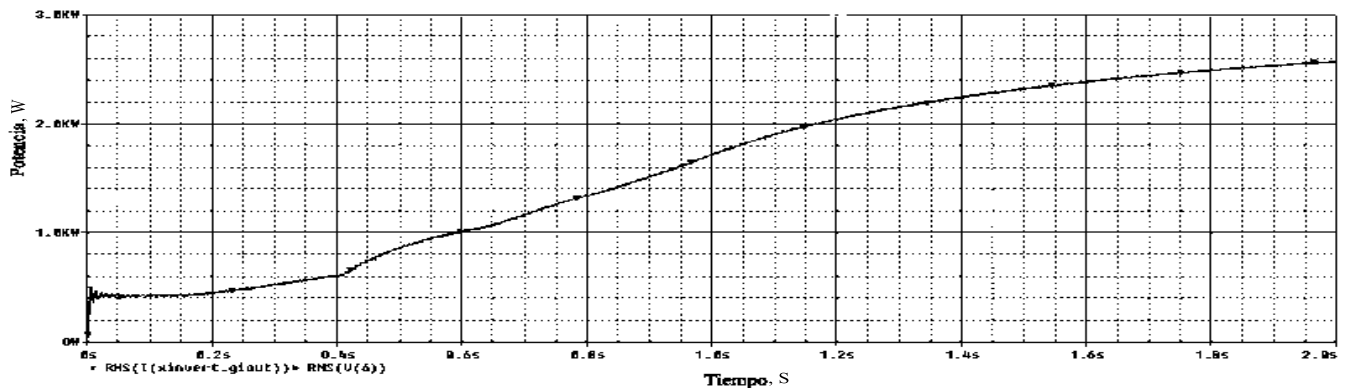
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.5: Valores eficaces del generador fotovoltaico: a) Nivel de irradiancia. b) Voltaje RMS de salida. c) Corriente RMS de salida y d) Potencia RMS inyectada al sistema eléctrico.

El factor de potencia es un factor importante para determinar la cantidad de energía generada por el sistema. El modelo del inversor fue diseñado para que el generador fotovoltaico entregue un factor de potencia igual a la unidad. En PSPICE es calculado como,

$$FP = \frac{P_{AVG}}{V_{RMS}I_{RMS}} \quad (4.1)$$

en donde P_{AVG} es la potencia promedio en la salida del inversor. La Figura 4.6 (b) muestra el factor de potencia del generador fotovoltaico obtenido en PSPICE. Se puede apreciar que efectivamente es un factor de potencia unitario.

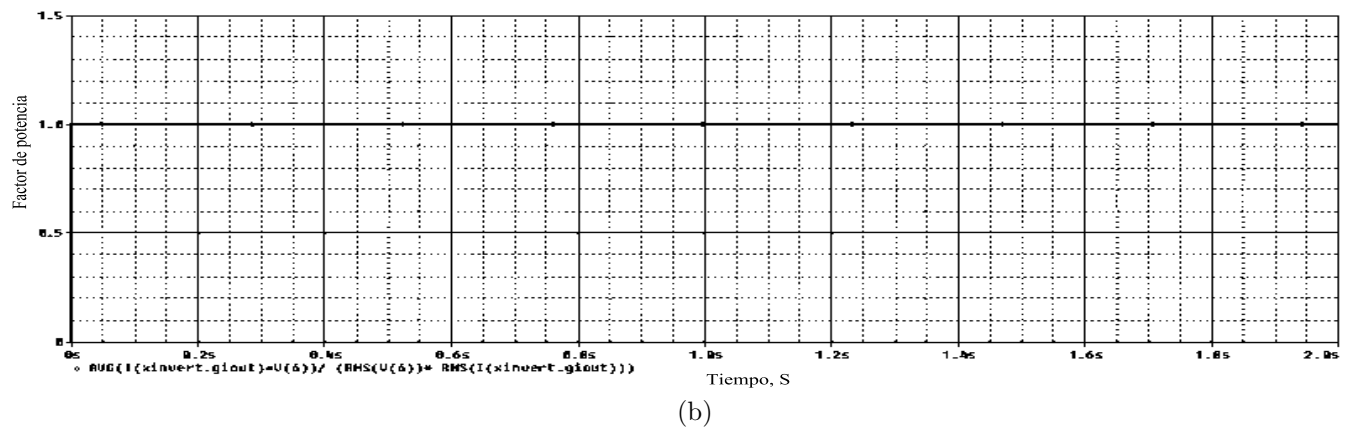
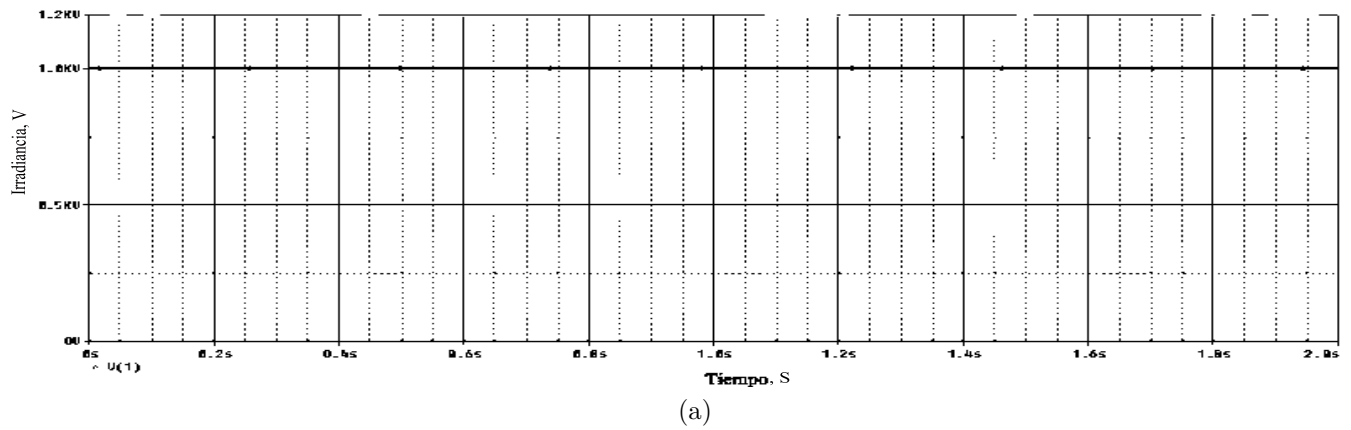


Figura 4.6: Factor de potencia del generador fotovoltaico: a) Nivel de irradiancia y b) Factor de potencia.

4.3. Caso de Estudio 3: Validación de resultados

En este caso de estudio se presenta la validación de los resultados obtenidos por simulación ante distintos valores de irradiancia y temperatura ambiente, los cuales se midieron el día 01 de julio del 2011 en la instalación fotovoltaica ubicada en la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos de CFE. Para llevar a cabo las simulaciones, se alimentaron al programa valores de irradiancia y temperatura ambiente medidas en el transcurso del día.

Los estudios comparativos presentados en esta sección se reportan en términos de valores de voltajes y corrientes a la entrada del inversor, así como también valores de voltaje, corrientes y potencias eficaces en la salida del inversor. La Figura 4.7 muestra el voltaje medido en la entrada del inversor monofásico en la fase A, en donde se puede apreciar que el valor de los voltajes que se obtuvieron en mediciones permanecen constantes. Por otra parte, se puede apreciar que el voltaje RMS obtenido por simulación disminuye conforme aumenta el nivel de irradiancia y alcanza un valor mínimo a las 14 horas. Este comportamiento del modelo implementado en PSPICE se debe a que el voltaje en la entrada del generador se calcula involucrando la temperatura de la celda, provocando que el voltaje se reduzca al aumentar la temperatura de operación de los módulos fotovoltaicos.

Cabe mencionar en este punto que los inversores que se encuentran instalados como parte del generador fotovoltaico en la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos tienen la capacidad de operar en tres distintos modos:

- Modo MPP: consiste en ajustar la tensión y la corriente del generador fotovoltaico para obtener la máxima potencia fotovoltaica de salida posible.
- Modo Voltaje Constante: consiste en mantener el voltaje a un valor fijo. Este modo es adecuado para el uso del inversor con pilas de combustible o en centrales hidroeléctricas pequeñas.
- Modo Turbina: es adecuado para generadores de CD. Se puede ajustar el inversor a la forma y pendiente de la curva de potencia de un generador determinado.

Por lo tanto, las mediciones de los voltaje de salida del arreglo fotovoltaico indican que los inversores están operando en el modo de voltaje constante. Esto explica las discrepancias observadas entre los valores de voltaje de entrada del inversor medidos y obtenidos por simulación.

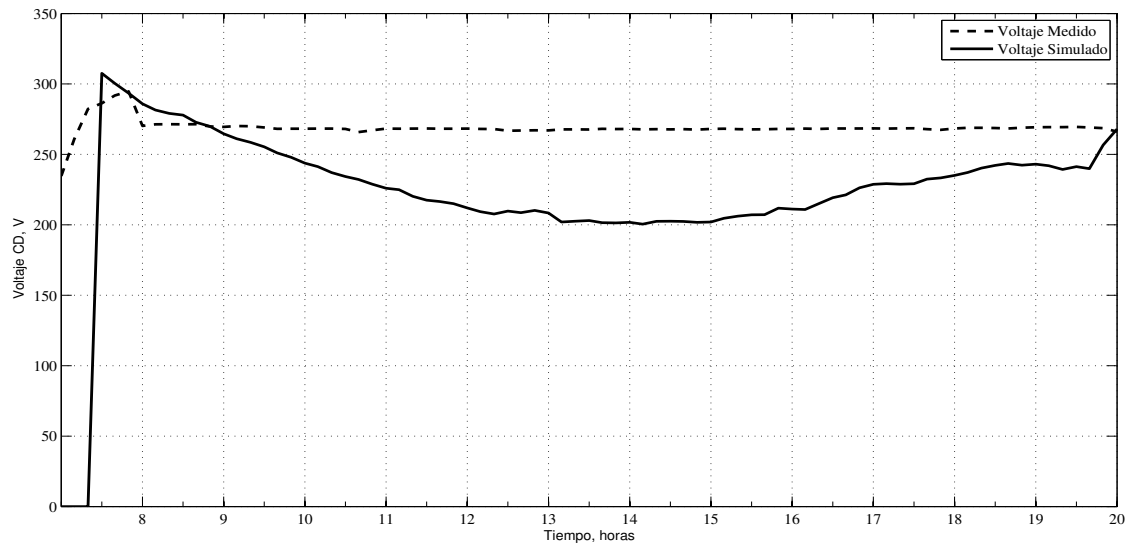


Figura 4.7: Comparación del voltaje en la entrada del inversor obtenido por medición y simulación.

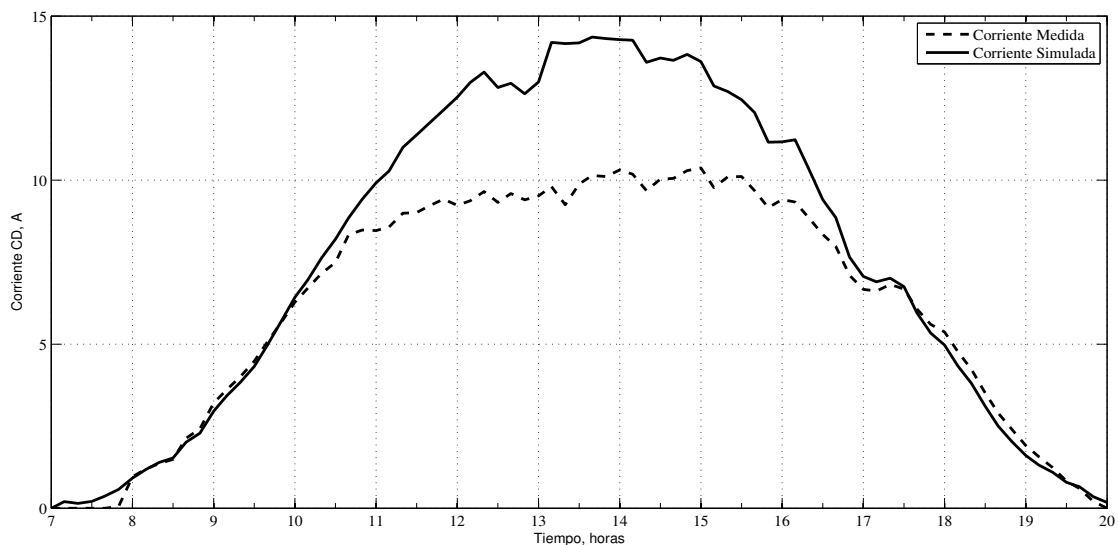


Figura 4.8: Comparación de la corriente en la entrada del inversor obtenida por medición y simulación.

En la Figura 4.8 se muestra la corriente que el arreglo entrega al inversor, en la cual se puede apreciar una discrepancia considerable de la curva obtenida por simulación con respecto de las curvas medidas en los tres inversores. El comportamiento que refleja la curva obtenida por simulación en un principio es similar a los valores medidos, sin embargo hay un incremento de dos amperes sobre las curvas de valores medidos que empieza a partir de las diez horas y se vuelve a igualar cuando reduce la irradiancia, que es a partir de las diecisiete horas. El modelo del generador fotovoltaico utiliza la temperatura ambiente para calcular la corriente en CD viéndose incrementada en las horas pico del día, como se muestra en la Figura 4.8.

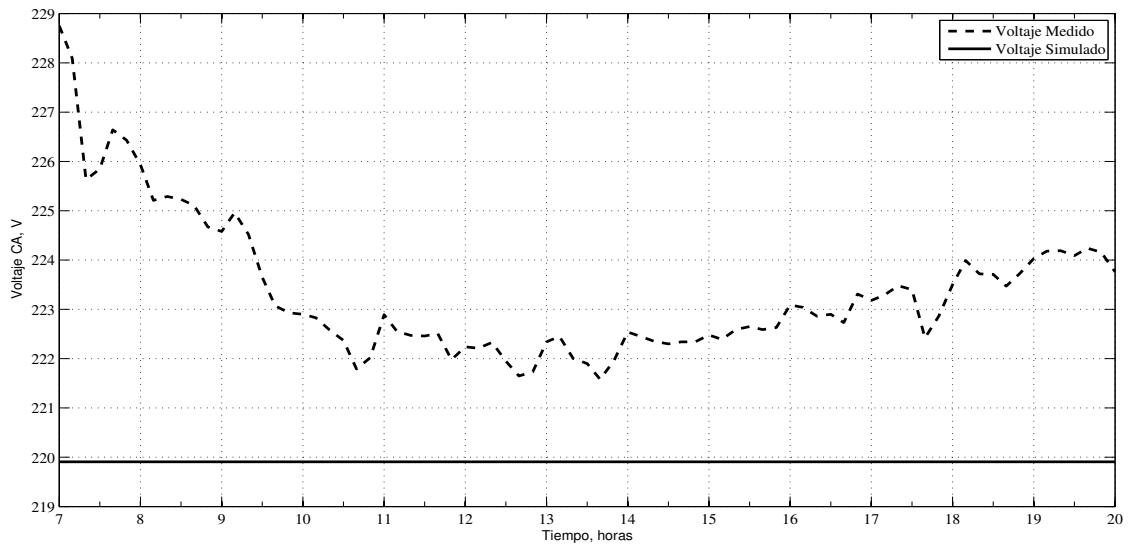


Figura 4.9: Voltaje en la salida del inversor.

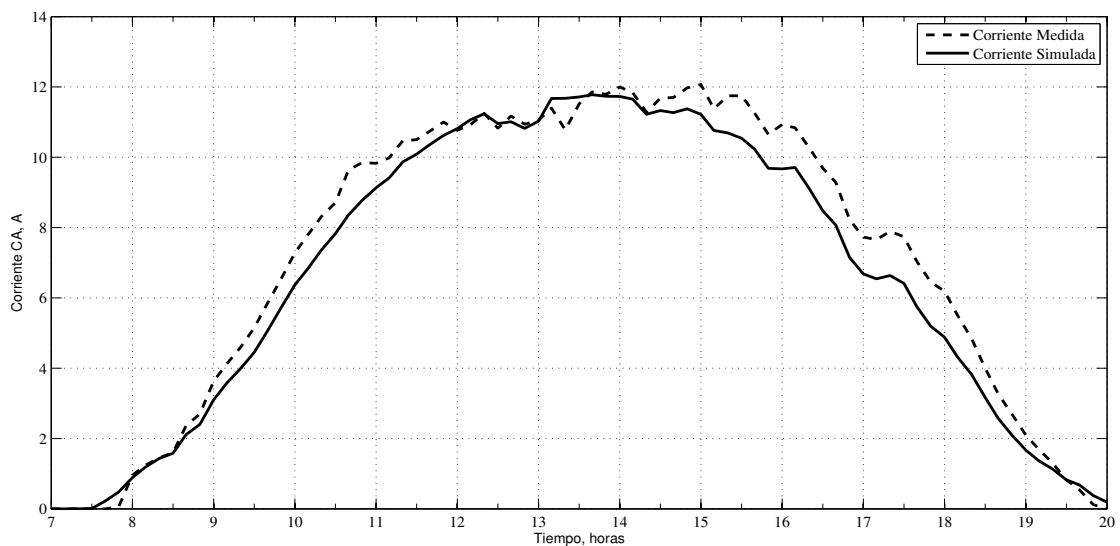


Figura 4.10: Corriente en la salida del inversor.

De igual manera se obtuvieron parámetros de simulación en la salida del inversor y se compararon con los valores obtenidos por medición. En la Figura 4.9 se muestra el comportamiento del voltaje en CA de la salida del inversor ante variaciones de irradiancia y temperatura ambiente. Los voltajes medidos de las tres fases son prácticamente iguales, las cuales difieren con los resultados obtenidos por simulación. El voltaje simulado indica que el voltaje de pico es de 311 V y no cambia ante variaciones de irradiancia o temperatura ambiente. Así mismo se comparan las corriente en la salida del inversor obtenidas por simulación (ver Figura 4.10), en donde se puede apreciar que en general los resultados simulados se comparan adecuadamente con los valores medidos. Por otra parte, se puede observar en la Figura 4.11 que la potencia

medida difiere muy poco de la potencia simulada. Por ejemplo, para el punto de máxima irradiancia que ocurrió a las 15 horas la potencia medida fue de 2627.86 Watts, mientras que la potencia simulada fue de 2590.1 Watts, es decir, una diferencia de 37.76 Watts. A partir de ese punto máximo, los valores obtenidos por simulación se comparan adecuadamente con las mediciones.

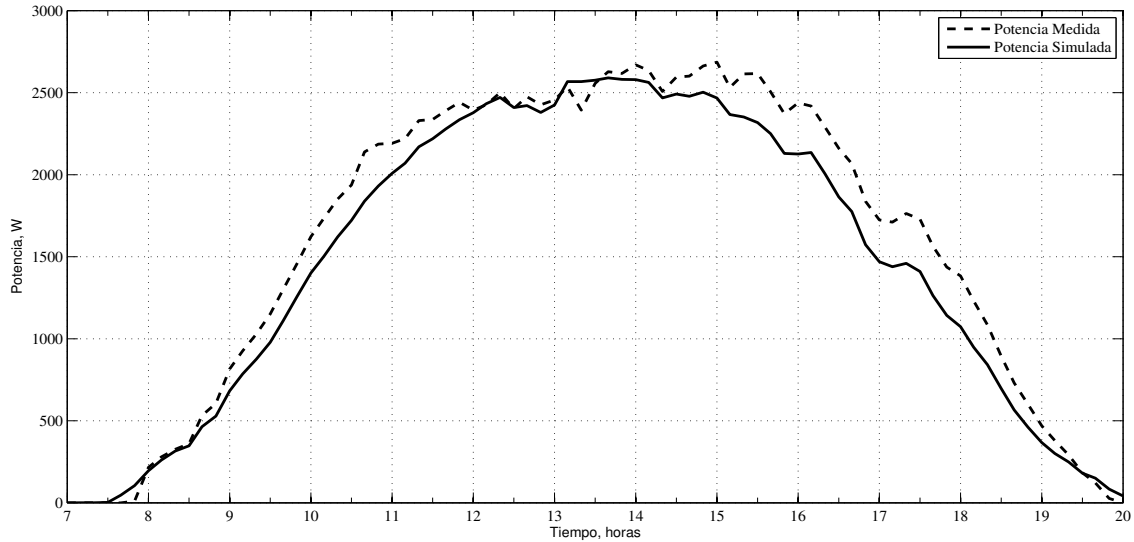


Figura 4.11: Potencia en la salida del inversor.

Para apreciar de manera más precisa la discrepancia que hay entre los resultados simulados y los valores obtenidos por medición, se muestra en la Figura 4.12 el error porcentual de estas comparaciones. Se puede apreciar que el mayor error porcentual se ubica a tempranas horas de la mañana y al anochecer. Durante las horas de máxima insolación el error porcentual se encuentra por debajo de 10 %.

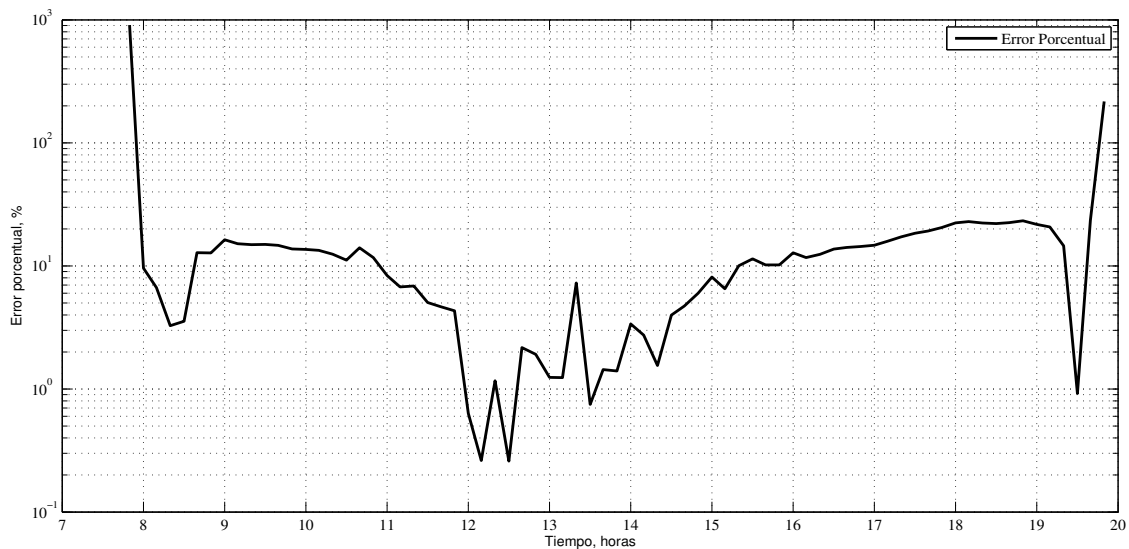


Figura 4.12: Error porcentual en la potencia de salida del inversor.

4.4. Conclusiones

En este capítulo se analizó el funcionamiento del sistema de generación fotovoltaico bajo condiciones de operación medidos en sistema de generación real. Se mostraron resultados de simulación para el caso de variación de irradiancia y temperatura constante, que refleja el comportamiento de la corriente en salida del inversor ante variaciones de irradiancia. Se discutió los resultados de simulación, mostrando distintas gráficas que reflejan resultados poco alejados a los valores obtenidos por simulación. Cabe destacar, que el modelo del inversor utiliza la característica de seguimiento de “Punto Máximo de Potencia” mientras el inversor real, utiliza el modo de operación de “Voltaje Constante”. Estas diferencias son la razón de las diferencias observadas entre los valores medidos y simulados.

Capítulo 5

CONCLUSIONES

En este capítulo se describen las conclusiones generales de esta tesis y los posibles trabajos futuros.

5.1. Conclusiones generales

Como parte central de esta tesis se aborda el estudio por simulación de un sistema de generación fotovoltaico constituido por un arreglo de paneles fotovoltaicos, un convertidor inversor y un circuito equivalente de la red eléctrica. Bajo este contexto, se presentan los casos de estudio del comportamiento del sistema de generación fotovoltaico bajo distintas condiciones de irradiancia y temperatura ambiente.

Se analizó el comportamiento del modelo ideal de la celda fotovoltaica, el cual está constituido por un diodo conectado en paralelo con una fuente de corriente. Se escaló el modelo ideal de la celda, con el objetivo de formular el modelo de un módulo fotovoltaico. En el modelo del módulo implementado en este trabajo se desprecia la resistencia en paralelo y un segundo diodo en paralelo debido a que son datos que se obtienen experimentalmente y difícilmente los proporciona el fabricante. Se simuló el comportamiento del módulo fotovoltaico, considerando las características eléctricas que se presenta en la hoja de datos del fabricante módulo fotovoltaico. Con la finalidad de reproducir las curvas V-I que proporciona el fabricante, se implementó un modelo que incorpora la dependencia a la temperatura.

Por otra parte, se implementó un modelo del generador fotovoltaico, incorporando la formulación del módulo fotovoltaico analizado previamente. Se describió el comportamiento del modelo del inversor y la determinación del Punto Máximo de Potencia del módulo fotovoltaico. El modelo del inversor implementado en este trabajo es muy básico ya que se modela a la

frecuencia fundamental y no se incluyen los armónicos típicos generados por el esquema de conmutación. Sin embargo, la representación utilizada en este trabajo es adecuada para determinar la corriente, voltaje y potencia generados por el sistema de generación fotovoltaico a frecuencia fundamental.

Finalmente se realizaron simulaciones con el modelo del sistema de generación fotovoltaico y se validaron los resultados mediciones proporcionadas por CFE. Se compararon los resultados obtenidos por simulación con los valores medidos. Se obtuvieron resultados muy adecuados demostrando que el modelo implementado en PSPICE es capaz de describir la operación del generador fotovoltaico ante distintos cambios de irradiación y temperatura de operación. Las discrepancias observadas en las curvas de voltaje, corriente y potencia están asociadas al modo de operación del inversor. De acuerdo a las mediciones el inversor opera en el modo de voltaje constante, mientras que el modelo implementado en este trabajo opera en el punto de máxima potencia.

5.2. Trabajos futuros.

- Mejorar el modelo del módulo fotovoltaico mediante la incorporación de una resistencia en paralelo y un segundo diodo en paralelo como parte del circuito equivalente de una celda fotovoltaica.
- Considerar efectos de cargas reactivas en la red eléctrica.
- Incorporar un modelo trifásico del convertidor inversor en lugar de tres inversores monofásicos.
- Incorporar el modelo del generador fotovoltaico en estudios de flujo de potencia y estabilidad transitoria para evaluar el impacto de dichas fuentes de generación en el sistema eléctrico.

Bibliografía

- [1] Pedro Sarmiento, *Energía Solar en Arquitectura y Construcción*, Chile: Ril Editores, 2007.
- [2] Gilbert M. Masters, *Renewable and Efficient Electric Power System*, EUA: John Wiley & Sons, 2004.
- [3] Energy Efficiency & Renewable Energy, *2010 Solar Technologies Market Report*, EUA: U. S. Department of Energy, 2011.
- [4] Gobierno Federal, *Energías Renovables para el Desarrollo Sustentable en México*, México: SENER, 2004.
- [5] Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Central Solar Fotovoltaica Piloto 5 MW Cierro Prieto, BC. México: CFE, 2011.
- [6] A. Chouder, S. Silvestre and A. Malek, *Simulation of Photovoltaic Grid Connected Inverter in Case Grid-failure*, España, 2006.
- [7] Sangita R Nandurkar, Mini Rajeev, *Design and Simulation of Three Phase Inverter for Grid Connected Photovoltaic Systems*, Feb 24-25, 2012, Vashi, India, págs 4. Proceedings of Third Biennial National Conference, NCNTE.
- [8] Gerencia de Comunicación Social CFE, *Síntesis Informativa*, CFE: 2011.
- [9] R. Foster, A. Romero y Aron Sanchez, *Bombeo de Agua con Sistemas Fotovoltaicos*, México: ANES, 1999.
- [10] *Solar Insolation Map - Caribbean, Mexico and Central America*, EUA: NREL, 2003.
- [11] Luis Castañer y Santiago Silvestre, *Modelling Photovoltaic System Using Pspice*, Inglaterra: John Wiley & Sons, 2002.

APÉNDICES

Apéndice A

Codificación del módulo fotovoltaico

Código para generar la curva característica ante variaciones de la temperatura de la celda.

```
.include module_beh.lib
xmodule 0 42 43 44 45 46 47 48 49 module_beh params: iscmr=8.20, coef_iscm=13.5e-3,
+ vocmr=36.8, coef_vocm=-0.14,pmaxmr=225,
+ noct=49,immr=7.68 , vmmr=29.3, tr=25, ns=60, np=1
.param tempe=1
vbias 44 0 dc 0
virrad 42 0 dc 1000
vtemp 43 0 dc {tempe}
.dc vbias 0 38 0.1 .
step param tempe list -11.25 3.75 18.75 33.75
.probe
.end
```

Código del subcircuito del módulo fotovoltaico.

```
.subckt module_beh 400 402 403 404 405 406 407 408 409 params:
+ iscmr=1, coef_iscm=1, vocmr=1, coef_vocm=1,pmaxmr=1,
+ noct=1,immr=1 , vmmr=1, tr=1, ns=1, np=1

girrad 400 401 value={v(402)/1000*(iscmr+coef_iscm*(v(407)-25))}

eisc 405 400 value={v(402)/1000*(iscmr+coef_iscm*(v(407)-25))}
evoc 406 400 value={if (v(405)>1e-11, vocmr+coef_vocm*(v(407)-25)+8.66e-5*
+ (v(407)+273)*log(v(405)/(iscmr)),0)}

etcell 407 400 value={v(403)+(noct-20)/800*v(402)}

gidiode 401 400 value={v(405)/(exp(v(406)/(ns*8.66e-5*(v(407)+273)))-1)*
+ (exp(v(401)/( ns*8.66e-5*(v(407)+273)))-1)}
rsm 401 404 {vocmr/(iscmr)-pmaxmr/(iscmr**2*(vocmr/(ns*0.0258)-log
+ ((vocmr/(ns*0.0258))+0.72))/(1+vocmr/(ns*0.0258)))} .
func frsm() {vocmr/(iscmr)-pmaxmr/(iscmr**2*(vocmr/(ns*0.0258)-log
+ ((vocmr/(ns*0.0258))+0.72))/(1+vocmr/(ns*0.0258)))}

gim 400 408 value={immr*v(402)/1000+coef_iscm*(v(403)-25)}
rimm 408 400 1
evmm 409 400 value={if (v(402)>0.001, ns*8.66e-5*(v(407)+273)*log(1+(v(405)-
v(408))/v(405)*(exp(v(406)/
+ (ns*8.66e-5*(v(407)+273)))-1))-v(408)*frsm,0)}

.ends module_beh
```

Apéndice B

Código del sistema de generación fotovoltaico conectado a la red eléctrica

Código para generar las simulaciones del sistema de generación fotovoltaico conectado a la red.

```
.include generator_beh.lib
xgenerator 0 1 43 3 45 46 47 20 30 generator_beh params:
+ iscmr=8.20, coef_iscm=13.5e-3, vocmr=36.8, coef_vocm=-0.14,pmaxmr=225,
+ noct=47,immr=7.68 , vmmr=29.3, tr=25, ns=60, nsg=9, npg=2

vm 1 0 dc 1000

vtemp 43 0 dc 25

d2 3 4 diode
.model diode d(n=1.1)

.inc inversor_CFE.cir
xinvert 4 0 6 20 30 inv params: nf=0.968

.inc red_CFE.cir
xgr1 6 0 red_CFE

.tran 1ms 2s 0 1ms
.probe
.end
```

Código del subcircuito del inversor.

```
*inversor_CFE.cir
.subckt inv 1 3 4 5 6 Params: nf=1
empp 1 3 value={v(6)-0.8}
r6 6 3 1000 r5 5 3 1
vc1 9 3 sin(0 1 60Hz)
eVc2 7 3 value={(v(6)*v(5)*nf*1.41)/220}
giout 3 4 value={v(7)*v(9)}
.ends inv
```

Código del subcircuito de la red eléctrica.

```
*red_CFE.cir
.subckt red_CFE 1 2
vc1 1 2 sin(0 311 60Hz)
rgrid 1 3 14.4
Lgrid 3 2 0.0005
.ends red_CFE
```

Código del subcircuito del comportamiento del generador fotovoltaico.

```
.subckt generator_beh 400 402 403 404 405 406 407 408 409 params:
+ iscmr=1, coef_iscm=1, vocmr=1, coef_vocm=1,pmaxmr=1,
+ noct=1,immr=1 , vmmr=1, tr=1, ns=1, nsg=1 npg=1

girrad 400 401 value={v(410)/1000*(npg*iscmr+npg*coef_iscm*(v(407)-25))}

ev402 411 400 value={v(402)+1} rfilt 411 410 0.01 cfilt 410 400 1000p
eiscm 405 400 value={v(410)/1000*(iscmr+coef_iscm*(v(407)-25))} evocm 406 400
value={if (v(405)>1e-11 & v(410)>10, (vocmr+coef_vocm*(v(407)-25)+8.66e-5* +
(v(407)+273)*log(v(405)/(iscmr))),0)}

etcell 407 400 value={v(403)+(noct-20)/800*v(410)}

gidiode 401 400 value={if (v(405)>1e-6 & v(406)>0.1, npg*v(405)/(exp(v(406)/(1.1*ns*8.66e-
5*(v(407)+273)))-1)*
+ (exp(v(401)/ (1.1*ns*nsg*8.66e-5*(v(407)+273)))-1),0)}
rsg 401 404 {nsg/npg*((vocmr/(iscmr)-pmaxmr/(iscmr**2*(vocmr/(ns*0.0258)-log
+ ((vocmr/(ns*0.0258))+0.72))/(1+vocmr/(ns*0.0258)))))}
.func frsg() {nsg/npg*((vocmr/(iscmr)-pmaxmr/(iscmr**2*(vocmr/(ns*0.0258)-log
+ ((vocmr/(ns*0.0258))+0.72))/(1+vocmr/(ns*0.0258)))))}

gimg 400 408 value={npg*(immr*v(410)/1000+coef_iscm*(v(403)-25))}
evmg 409 400 value={if (v(410)>1, nsg*(ns*8.66e-5*(v(407)+273)*log(1+(v(405)-
v(408)/npg)/v(405)*(exp(v(406)/
+ (1.1*ns*8.66e-5*(v(407)+273)))-1))-v(408)*frsg/nsg),0)}

.ends generator_beh
```

Apéndice C

Especificaciones del fabricante del módulo fotovoltaico

Tabla. C.1: Datos eléctricos del módulo Siliken de 225 W.

Electrical Data									
Maximum power at STC (+3/0 %)	P_{mp} (W)	205	210	215	220	225	230	235	240
Efficiency at STC	η (%)	12.6	12.9	13.2	13.6	13.9	14.2	14.5	14.8
Power per Unit Area	P_{sqft} (Wp/SqFt)	11.7	12.0	12.3	12.6	12.9	13.2	13.4	13.7
CEC PTC* Rating	P_{PTC} (W)	183.8	188.4	193.0	197.6	202.2	206.8	211.4	216.1
Voltage at Maximum Power	V_{mp} (V)	28.7	28.9	29.0	29.2	29.3	29.5	29.5	29.6
Current at Maximum Power	I_{mp} (A)	7.15	7.30	7.41	7.54	7.68	7.79	7.97	8.12
Open Circuit Voltage	V_{oc} (V)	36.4	36.5	36.6	36.7	36.8	36.9	36.9	37.0
Short Circuit Voltage	I_{sc} (A)	7.90	8.00	8.02	8.10	8.20	8.32	8.47	8.61
Maximum Voltage UL / IEC	V_{max} (V) UL/IEC	600 / 1000							
Temperature Coefficient of Pmp	$T_k P_{mp}$ (%/°C)	-0.47							
Temperature Coefficient of Voc	$T_k V_{oc}$ (%/°C)	-0.356							
Temperature Coefficient of Isc	$T_k I_{sc}$ (%/°C)	+0.062							
Normal Operating Cell Temperature	NOCT (°F)/(°C)	120.2±3.2 (49±2)							

Values at Standard Test Conditions STC: Irradiance 92.94 W/ft² (1,000 W/m²), Air Mass AM 1.5 and cell temperature 77°F (25°C)

*PTC refers to PVUSA (Photovoltaics for Utility Scale Applications) Test Conditions. Irradiance 92.94 W/ft² (1,000 W/m²), 77°F (25°C) Air Temperature, Wind Speed 3.2 ft/s (1 m/s) at 32 ft (10 m) above ground level.

Tabla. C.2: Parámetros del inversor SMA Sunny Boy.

	SB 5000US
Recommended Maximum PV Power (Module STC)	6250 W
DC Maximum Voltage	600 V
Peak Power Tracking Voltage	250–480 V
DC Maximum Input Current	21 A
Number of Fused String Inputs	3 (Inverter), 4 x 20 A (DC disconnect)
PV Start Voltage	300 V
AC Nominal Power	5000 W
AC Maximum Output Power	5000 W
AC Maximum Output Current (@ 208, 240, 277 V)	24 A, 21 A, 18 A
AC Nominal Voltage Range	183 – 229 V @ 208 V 211 – 264 V @ 240 V 244 – 305 V @ 277 V
AC Frequency: nominal / range	60 Hz / 59.3 – 60.5 Hz
Power Factor (Nominal)	0.99
Peak Inverter Efficiency	96.8%
CEC Weighted Efficiency	95.5% @ 208 V 95.5% @ 240 V 95.5% @ 277 V
Dimensions: W x H x D in inches	18.4 x 24.1 x 9.5
Weight / Shipping Weight	141 lbs / 148 lbs
Ambient Temperature Range	–13 to 113 °F
Power consumption at night	0.1 W
Topology	Low frequency transformer, true sinewave
Cooling Concept	OptiCool™, forced active cooling
Mounting Location: indoor / outdoor (NEMA 3R)	●/●
LCD Display	●
Communication: RS485 / wireless	○/○
Warranty: 10 years / 15 years / 20 years	●/○/○
Compliance: IEEE-929, IEEE-1547, UL 1741, UL 1998, FCC Part 15 A & B	●