



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA ELECTRÓNICA

Licenciatura en Ingeniería en Energías Renovables

Validación serie-paralelo de un modelo no-lineal en arreglos fotovoltaicos

Presenta

Daniela Corona Luna

TESIS

Tesis presentada para obtener el grado de
Licenciada en Ingeniería en Energías Renovables

Asesor

Dr. Víctor Rodolfo González Díaz

Puebla, Julio 2025

Agradecimientos

A mis padres; Irma J. Luna Cote y Edgar Corona Xicohtécatl, por todo su apoyo brindado durante este tiempo.

A mi asesor el Dr. Víctor Rodolfo González Díaz por sus asesorías para la realización de esta tesis, y a los profesores del jurado Dr. José Fermi Guerrero Castellanos, Dr. Luis Armando Moreno Coria y Dr. Osvaldo López Hernández por sus observaciones y correcciones.

Resumen

En este trabajo se presenta el proceso de diseño y validación de una celda solar fotovoltaica en el programa de diseño de circuitos Virtuoso de Cadence®. Uno de los principales problemas en la entrega de potencia en arreglo fotovoltaicos son las pérdidas por desajuste que ocurren cuando uno o varios módulos sufren de sombreado por causas como árboles o construcciones cercanas, nubosidad, módulos adyacentes, entre otros. Al estar conectados en serie, paralelo, o una combinación de ambos, el sistema entero puede ser afectado y entregar una baja potencia. El modelo diseñado tiene dependencia de la irradiancia y temperatura, estos factores pueden modificarse dependiendo el escenario que se quiera simular. Se realizan mediciones experimentales en laboratorio para obtener los parámetros adecuados en su implementación en VerilogA, consiguiendo una respuesta muy cercana a la de un modelo real en campo. Posteriormente se realizan bancos de prueba con distintos escenarios a los que se puede enfrentar un arreglo fotovoltaico, variando la irradiancia y temperatura, analizando el punto de máxima potencia con ayuda de las curvas características de corriente, voltaje y potencia del sistema. Por último, se diseña una celda unitaria y una celda unitaria anidada que contiene varias celdas internas que pueden cambiar su conexión a serie o paralelo entre sí mediante un switch.

Este trabajo se divide en 5 capítulos en los cuales se da una introducción sobre la energía solar, y la justificación de este trabajo, se presentan los planes de acción impulsados por gobiernos y organizaciones a favor de mitigar la emisión de gases de efecto invernadero, donde la obtención de energía juega un papel importante. Posteriormente en el marco teórico se explica de forma más detallada el funcionamiento de un panel solar así como la forma de modelarla, las curvas características I-V y P-V, las conexiones posibles en un arreglo fotovoltaico y el modelo de un panel solar que toma en cuenta condiciones de irradiancia y temperatura. En el siguiente capítulo se muestra la forma en la que se realizó la caracterización de un panel solar, la obtención de los parámetros utilizados, el diseño del modelo y la forma de simular. A continuación se muestra el capítulo de los resultados obtenidos, el diseño del switch para la construcción del módulo unitario y del módulo anidado, así como las curvas características del sistema en distintas condiciones de irradiancia, temperatura y conexión. Finalmente en el último capítulo se presentan las conclusiones.

Contenido

1	Introducción	1
1.1	Objetivos	2
1.2	Justificación	2
1.2.1	Agenda 2030	4
1.2.2	Programas Nacionales Estratégicos (PRONACES)	5
1.2.3	Crecimiento de la industria fotovoltaica	6
2	Marco teórico	9
2.1	Energía Solar	9
2.2	Semiconductores	10
2.3	Unión p-n	11
2.4	Efecto fotovoltaico	13
2.5	Celdas solares	14
2.6	Curvas características de una celda solar	15
2.7	Modelo de un solo diodo (single diode)	17
2.8	Conexiones serie-paralelo	19
2.9	Entendimiento de las curvas características	19
2.10	Pérdidas por desajuste	21
3	Simulación y validación de arreglos fotovoltaicos	24
3.1	Obtención de parámetros del modelo	24
3.2	Descripción del diseño de un módulo fotovoltaico	28
3.3	Conexión serie-paralelo	33
4	Resultados de simulación comportamental	36
4.1	Modelo del interruptor.	36
4.2	Módulo unitario	37
4.2.1	Prueba eléctrica en condiciones de medida estándar (STC)	38
4.2.2	Prueba eléctrica en condiciones variables	43
4.3	Módulo anidado	45
4.3.1	Configuración serie	47
4.3.2	Configuración en paralelo	49
4.3.3	Combinación 1	51
4.3.4	Combinación 2	53
4.3.5	En condiciones variables	54
4.4	Análisis de rendimiento con sombreado	57

4.5 Simulación transitoria	59
4.6 Comparación con trabajos similares	60
5 Conclusión	63
6 Trabajo a futuro	65
Referencias	66
List of Figures	70
List of Tables	71
List of Listings	72

CAPÍTULO 1

Introducción

En la época actual, la energía se ha convertido en un recurso indispensable para el desarrollo socioeconómico de la sociedad. La mayor fuente de donde se obtiene este recurso es la quema de combustibles fósiles, lo que implica una emisión de agentes contaminantes en el aire y la generación de gases de efecto invernadero (GEI) [1]. Los combustibles fósiles llevan cientos de años generando energía, sin embargo su uso desmedido al ser recursos no renovables, ha provocado que se busquen fuentes alternas de energía, siendo un ejemplo de ello las energías renovables (como la hidroeléctrica, biomasa, eólica y fotovoltaica), generan electricidad con una emisión mínima o nula de GEI.

La energía fotovoltaica ha crecido a pasos agigantados en la última década alrededor del mundo, ya que esta energía renovable aprovecha el recurso solar como combustible que posteriormente es convertido en energía eléctrica. En años más recientes han incrementado las innovaciones en eficiencia, aplicaciones y costos, haciéndola una energía renovable cada vez más competente y asequible para todos.

El crecimiento en este sector actualmente se debe en mayor parte a razones prácticas y económicas, sin embargo, una de las razones por las que se impulsa el desarrollo de fuentes de energía alternas es porque disminuyen el impacto ambiental de las fuentes de generación energéticas usuales, como los combustibles fósiles. El impacto ambiental de las fuentes de energía renovable, y en específico de la energía solar es significativamente menor, de ahí la importancia de su estudio y uso en el futuro.

En este Capítulo se da un panorama general sobre la energía solar, la industria fotovoltaica a nivel mundial y en México, se presenta la definición del efecto fotovoltaico, se introduce al tema de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), también se presentan los objetivos y la justificación de este trabajo de tesis.

1.1 Objetivos

General

Validar un modelo comportamental para celdas fotovoltaicas con conexión serie paralelo considerando irradiancia y temperatura.

Específicos

1. Describir un modelo comportamental para celdas fotovoltaicas en VerilogA.
2. Incluir la dependencia de la irradiancia y temperatura en el modelo comportamental.
3. Validar el modelo con los parámetros de celdas comerciales y conocidas.
4. Construir el banco de simulación para la conexión serie-paralelo en VerilogA.
5. Documentar la simulación del sistema con los datos obtenidos mediante curvas de Potencia-Voltaje.

1.2 Justificación

Hoy en día, el uso de energía eléctrica es una necesidad básica alrededor del mundo, esta demanda está en crecimiento debido al desarrollo de la población. La dependencia a los combustibles fósiles no es sostenible en el futuro próximo, ya que contamos con un recurso limitado de estos recursos y contribuyen a la contaminación atmosférica, terrestre y marítima. Por esta razón es primordial reducir nuestro consumo de fuentes de energía limitadas, es ahí en donde las energías renovables juegan un papel clave. Dentro de las energías renovables, la energía solar es una valiosa herramienta, ya que usa la inagotable radiación solar y los avances e inversión que hay en su desarrollo, tecnología, eficiencia y costos mejoran cada año. La mayor fuente de energía que tenemos es el Sol, esta estrella es la raíz de la vida en la Tierra y de él derivan todas las energías renovables de manera directa o indirecta.

México, al estar incluido en el Acuerdo de París, adquirió compromisos internacionales para llevar a cabo acciones con el fin de mantener el aumento de temperatura global por debajo de los 2°C. Siguiendo esta línea, se tiene una meta de energías limpias establecida en la Ley de Transición Energética en donde se pretende un aumento de al menos 35% del total de electricidad generada por energías limpias en el país. De acuerdo al CENACE, el año en el que se tuvo mayor contribución, fue en 2021 con un 29.5%, cifra que aumentó en 2022 con un 31.2%. En el primer semestre de 2023, la generación neta de energías renovables alcanzó los 36,914.9 GWh [2]. Existe una relación entre el CO_2 emitido por la actividad humana y watt de energía eléctrica, al que se denomina factor de emisión, el cual, de acuerdo a la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) en México corresponde a 0.438 tCO_2e/MWh (toneladas de bióxido de carbono equivalente por Megawatt-hora) a febrero de 2024. De acuerdo al IPCC en 2019, el 77% total de las emisiones de gases de efecto invernadero vinieron del sector de energía, industria y transporte [3]. La reducción de gases de efecto invernadero y la mitigación de los efectos ocasionados por el cambio climático son

prioridades para los gobiernos de países alrededor del mundo, ya hemos sido testigos de sus efectos devastadores como sequías, enfermedades mortales causadas por la contaminación, huracanes con magnitudes nunca antes vistas, deshielo en los polos y elevación del mar, entre otros.

La simulación de sistemas desempeña un papel fundamental en el análisis y diseño de dispositivos electrónicos, ya que permite evaluar su comportamiento bajo diversas condiciones sin la necesidad de construir prototipos físicos. En el caso de los arreglos fotovoltaicos, la simulación proporciona un entorno controlado donde es posible modelar variaciones en parámetros como la irradiancia, la temperatura y la configuración del sistema, optimizando así el proceso de validación y ajuste de los modelos. A diferencia de las mediciones experimentales, que requieren equipos costosos y condiciones ambientales específicas, la simulación reduce significativamente los tiempos y costos de desarrollo, además de ofrecer mayor flexibilidad para la prueba de distintos escenarios. Asimismo, permite identificar y corregir errores de diseño antes de la implementación física, lo que resulta esencial para la optimización de sistemas complejos como los arreglos fotovoltaicos con reconfiguración dinámica. Por estas razones, el uso de herramientas de simulación, como Virtuoso de Cadence, se ha convertido en una metodología clave para la investigación y desarrollo en el campo de la energía renovable. Este programa tiene una ventaja que lo diferencia del resto, ya que los circuitos modelados en Cadence pueden ser usados para el diseño de dispositivos a nivel físico, abriendo un panorama amplio de aplicaciones como la implementación de un chip de inteligencia artificial para su mejor funcionamiento o diseñar un sistema de control basado en la conmutación digital. [4]

El creciente desarrollo de herramientas de hardware y software en los últimos años ha impulsado un renovado interés en los arreglos fotovoltaicos reconfigurables, tanto en el ámbito académico como en el tecnológico. La idea de modificar dinámicamente las conexiones entre módulos solares, en función de las condiciones de operación o la demanda de carga, fue planteada desde la década de 1970 y retomada en trabajos de investigación en los años 90 [5]. Sin embargo, en ese momento, la aplicación práctica de estas propuestas era limitada, principalmente por la falta de componentes electrónicos adecuados que permitieran implementar interruptores con un costo y fiabilidad aceptables. En este contexto, el presente trabajo adquiere relevancia al retomar esta línea de investigación bajo las condiciones tecnológicas actuales, donde es posible diseñar y validar este tipo de sistemas de manera efectiva mediante simulación y herramientas digitales.

Una de las fallas más comunes en sistemas fotovoltaicos son las pérdidas por desajuste (mismatch losses en inglés), estas puede reducir la generación de energía directamente en un sistema fotovoltaico, así como afectar los algoritmos de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) al provocar múltiples picos en las curvas características. Por lo tanto, las técnicas de re configuración de matrices fotovoltaicas han ganado popularidad para minimizar los efectos causados por estas pérdidas. En este trabajo se presenta el diseño de una celda unitaria que permite una mejora en este aspecto, maximizando así la generación de energía del conjunto fotovoltaico. Se presentan las curvas características de diferentes escenarios

cambiando las variables de irradiancia y temperatura, así como los resultados obtenidos de la simulación en las distintas pruebas de la celda unitaria al cambiar el tipo de conexión.

1.2.1 Agenda 2030

En años recientes, la conversación alrededor del cambio climático y la reducción de los gases de efecto invernadero que producimos ha acaparado todas la esferas. Las actividades humanas, causa del constante aumento en la temperatura de la tierra, han alcanzado un límite, el cual, de no controlarse y de acuerdo al Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés), elevará la temperatura media mundial por encima de los 3 °C, provocando efectos devastadores en el planeta como lo conocemos.

En 2015, la Asamblea General de la ONU estableció un plan de metas al que llamaron “Agenda 2030”, esto como fruto de años de negociaciones entre países, acuerdos en común e interacción con la sociedad civil, con el propósito de fortalecer la paz universal y el acceso a la justicia. La Agenda plantea 17 Objetivos con 169 metas de carácter integrado que abarcan las esferas económica, social y ambiental. Sin embargo en el 2024, a medio camino de la fecha límite de 2030, el informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2023 muestra que más de la mitad del mundo se está quedando atrás [6].

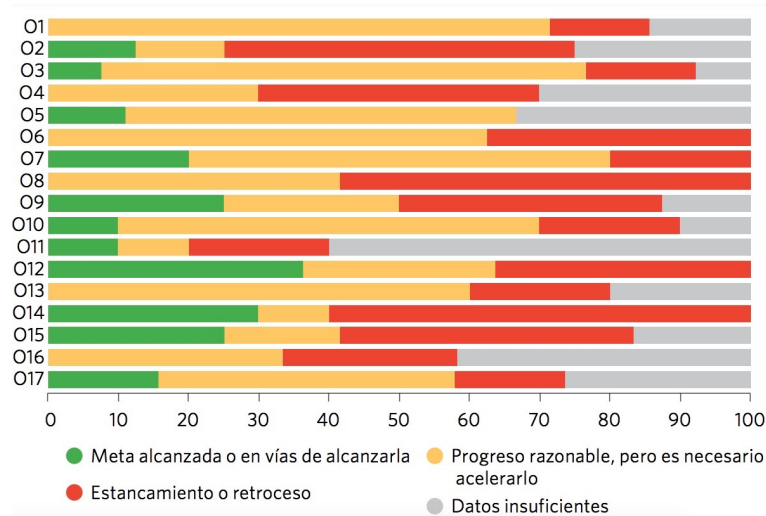


Figura 1.1: Evaluación del progreso de los 17 Objetivos basada en las metas evaluadas, 2023 o datos más recientes (porcentaje) [6]

El informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2023 remarca que el mundo continúa avanzando para alcanzar las metas de energía sostenible, pero no lo suficientemente rápido. Para garantizar que todos puedan acceder a la energía eléctrica para el año 2030, debemos acelerar la electrificación, aumentar las inversiones en energía renovable, mejorar la eficiencia energética y desarrollar políticas y marcos regulatorios propicios.

Las energías renovables tienen un papel importante en el cumplimiento de estas metas, esto ha ayudado a su crecimiento alrededor del mundo. Su desarrollo es de carácter urgente, ya que son una valiosa herramienta hacia un futuro energético sustentable y no contaminante.

De las 17 metas por alcanzar que tiene la Agenda 2030, existen 3 en donde las energías renovables tienen mayor incidencia para poder lograrlas, estas son:

- 7: Energía asequible y no contaminante
- 9: Innovación, industria e infraestructuras
- 13: Acción por el clima

1.2.2 Programas Nacionales Estratégicos (PRONACES)

En el panorama mexicano, el Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAH-CYT) creó un plan en coordinación con el Gobierno de México llamado Programas Nacionales Estratégicos (PRONACES) con el propósito de dar solución a problemáticas nacionales concretas que necesitan atención urgente. Esto se busca en colaboración con especialistas, el sector público y el privado; estableciendo metas de corto, mediano y largo plazo. Puesto que su objetivo es investigar las razones que agudizan o impiden la solución de las problemáticas, el abordaje es multidimensional e interdisciplinario, tomando en consideración los conocimientos teórico-prácticos más avanzados generados por las humanidades, ciencias y tecnologías [7].



Figura 1.2: 10 PRONACES CONAHCYT [7]

Estas prioridades estratégicas han sido identificadas en múltiples estudios y en encuestas (como las realizadas por el Foro Consultivo Científico y Tecnológico); tienen coincidencia con los Objetivos de Desarrollo Sostenible planteados por la ONU en su agenda 2030, así como con prioridades del Gobierno Federal [8]. La agenda de los PRONACES se concentró en 10

temas: Agentes tóxicos y procesos contaminantes, Gestión del ciclo socio natural del agua, Educación, Energía y Cambio Climático, Salud, Seguridad humana, Sistemas socioecológicos y sustentabilidad, Soberanía alimentaria, Cultura, Vivienda y Hábitat (Fig. 1.2).

Los PRONACES operan mediante convocatorias en donde se invita a la comunidad científica, pública y privada, a proponer proyectos que den solución a problemáticas relacionadas con los 10 ejes mencionados anteriormente, buscando ser financiados y de largo alcance (hasta 5 años); dichas propuestas son llamadas Proyectos Nacionales de Investigación e Incidencia (Pronaii).

El eje en el que hay incidencia es Energía y Cambio Climático, ya que la energía fotovoltaica juega un papel importante en la transición energética a energías limpias, ocupando el primer puesto de energías renovables en generación distribuida y capacidad instalada acumulada, cerrando con 3,341 MW de acuerdo al Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN) 2024-2038 en 2023.

1.2.3 Crecimiento de la industria fotovoltaica

Los primeros dispositivos fotovoltaicos llegaron en la década de 1950, pero fue en la década de 1960 en donde la investigación tuvo un gran impulso, teniendo sus primeras aplicaciones en la industria espacial debido a su practicidad. Sin embargo, al no haber una necesidad de otro tipo de generación eléctrica aparte de la convencional, su desarrollo fue puesto en pausa. A pesar de ello la variedad de aplicaciones despertó la atención de investigadores y en las décadas de 1980 y 1990 la eficiencia de las células solares llegó a un 20%, en consecuencia, la industria fotovoltaica tuvo un crecimiento estable de entre 15% y 20% durante esas décadas. Actualmente la industria fotovoltaica tiene un crecimiento nunca antes visto a nivel mundial, con un 58% en 2023 y un 42% en 2022 con respecto al año anterior [9].

De acuerdo con la Agencia Internacional de Energía (IEA, por sus siglas en inglés), México ha tenido un crecimiento exponencial en cuanto a producción de energía fotovoltaica tan solo desde 2015, como puede apreciarse en la Fig. 1.3. Esto trae grandes beneficios como la creación de nuevos empleos, capacitación especializada en este rubro, crecimiento económico dentro del país, mayor independencia energética y menor impacto ambiental.

Esta información también es confirmada por el Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN) publicado en 2023 (Fig. 1.4), el cual proporciona datos relevantes sobre el Programa Indicativo para la Instalación y Retiro de Centrales Eléctricas (PIIRCE). Este programa establece de forma indicativa los requerimientos de capacidad de generación para satisfacer la demanda de energía eléctrica, y cumplir con las Metas de Energías Limpias en México.

Así mismo, el Centro Nacional de Control de Energía (CENACE) prevé que para el periodo de 2027-2037 se lleve a cabo una transición energética, en su mayoría, a fuentes de energía renovable, como se observa en la Fig. 1.5.

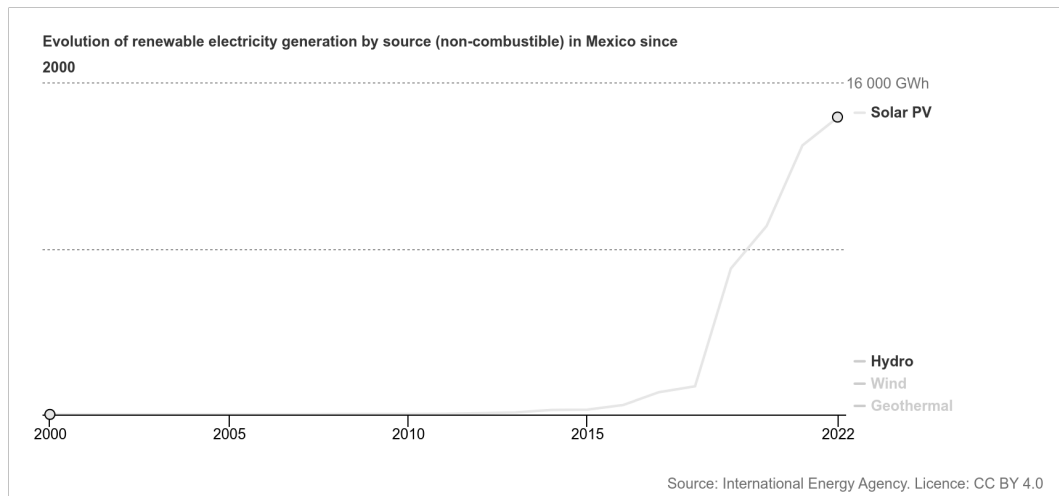


Figura 1.3: Evolución de la generación de electricidad por fuentes fotovoltaicas en México desde 2000 [9]

México cuenta con una ubicación privilegiada dentro del planeta, la mayoría de los días en este lugar son soleados, por lo que el país está en una posición perfecta para poder aprovechar al máximo el recurso solar. Sin embargo, es cierto que la introducción de esta tecnología ha enfrentado obstáculos considerables, tales como: falta de infraestructura adecuada, percepción de altos costos y la complejidad de los procesos de instalación.

La participación de las energías renovables, especialmente la energía fotovoltaica, tendrá un papel fundamental en el desarrollo energético del país los próximos años, por lo que es de suma importancia su estudio para maximizar su eficiencia y de esta manera lograr mayor independencia energética disminuyendo el uso de combustibles fósiles.

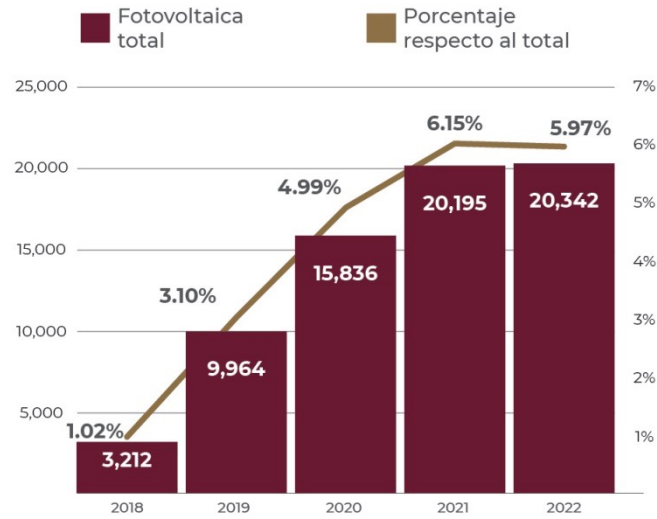


Figura 1.4: Generación fotovoltaica total en México 2018-2022 (GWh) y su porcentaje respecto a la generación total [10]

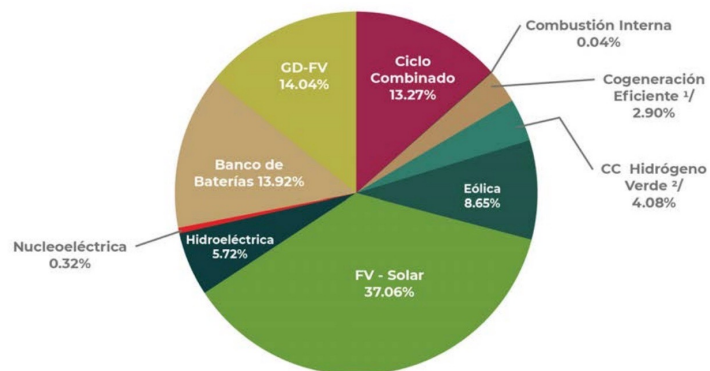


Figura 1.5: Porcentaje de adición de capacidad por tecnología de 2027 a 2037 [10]

CAPÍTULO 2

Marco teórico

2.1 Energía Solar

El Sol es la estrella más cercana a la Tierra y pertenece a nuestro sistema solar. Esta estrella emite una gran cantidad de radiación; en su núcleo son producidas reacciones de fusión nuclear convirtiendo el hidrógeno contenido en helio, este proceso libera energía en una gran cantidad y esa energía llega a nuestro planeta tierra en forma de rayos solares. Parte de esa radiación entra a la Tierra de manera directa, sin embargo otra parte, al pasar por la atmósfera, sufre procesos de reflexión, atenuación y difusión, debido a la interacción con nubes, moléculas de ozono, dióxido de carbono, oxígeno, vapor de agua, entre otros.

La energía solar es la principal fuente de energía en el planeta de forma directa o indirecta. La energía que recibimos del Sol permite el desarrollo y crecimiento de todos los seres vivos. Por lo tanto, los seres humanos también han buscado sacar provecho de la energía solar para otros propósitos. Por ejemplo, en los combustibles fósiles, los cuales son básicamente materia vegetal y otros organismos vivos guardados en el subsuelo terrestre por miles de años; como el carbón, el petróleo y el gas natural. Asimismo, la biomasa aprovecha la energía solar en el proceso llamado "fotosíntesis" presente en la plantas, este produce oxígenos y alimento, que posteriormente se convierte en materia orgánica y provee energía que se puede utilizar para obtener calor o electricidad. La energía eólica, usada durante cientos de años para proporcionar energía mecánica o transporte, utiliza corrientes de aire creadas por el aire calentado por el Sol y por la rotación de la tierra. Actualmente, las turbinas eólicas convierten la energía eólica en electricidad. Incluso la energía hidráulica se deriva del sol. La energía hidráulica depende de la evaporación del agua por el sol, que luego regresa a la Tierra en forma de lluvia, abasteciendo de agua a las presas. La energía fotovoltaica (o PV, por sus siglas en inglés) es un método práctico y eficiente de aprovechar la energía del Sol [11].

2.2 Semiconductores

La energía solar fotovoltaica es aquella que convierte la radiación solar en electricidad mediante el efecto fotovoltaico, del cual se hablará con mayor detalle más adelante. La manera de realizar esta conversión de energía es mediante celdas solares. Estos dispositivos, mayormente hechos de silicio, permiten que la luz que incide en ellos genere corriente eléctrica. Una celda solar está formada por la unión de materiales p-n, este fenómeno forma base no sólo para la mayoría de celdas solares, sino también para otros dispositivos electrónicos tales como láseres y transistores de unión bipolares [11].

Los materiales se clasifican de acuerdo a sus propiedades eléctricas, en tres grupos: conductores, semiconductores y aislantes. Los materiales semiconductores, como su nombre lo indica, se caracterizan por tener una conductividad eléctrica menor a la de un material conductor y mayor a la de un aislante. Un semiconductor en estado puro (intrínseco) no conduce de manera correcta la corriente, ya que el número de electrones libres en la banda de conducción es limitado al igual que los huecos presentes en la banda de valencia. Así que el semiconductor intrínseco se debe modificar añadiendo impurezas, incrementando el número de electrones libres o huecos para aumentar su conductividad. Los materiales semiconductores más comunes son el silicio, el germanio y el carbón. Existen dos tipos de semiconductores impuros, el tipo p y el tipo n [5]. A temperaturas elevadas, especialmente a las temperaturas donde las células solares operan, los electrones pueden ganar suficiente energía para escapar de sus enlaces. Cuando esto sucede, los electrones son libres de moverse por la red cristalina y participar en la conducción. A temperatura ambiente, un semiconductor tiene suficientes electrones libres para conducir la corriente. Cerca del cero absoluto un semiconductor se comporta como un aislante [11].

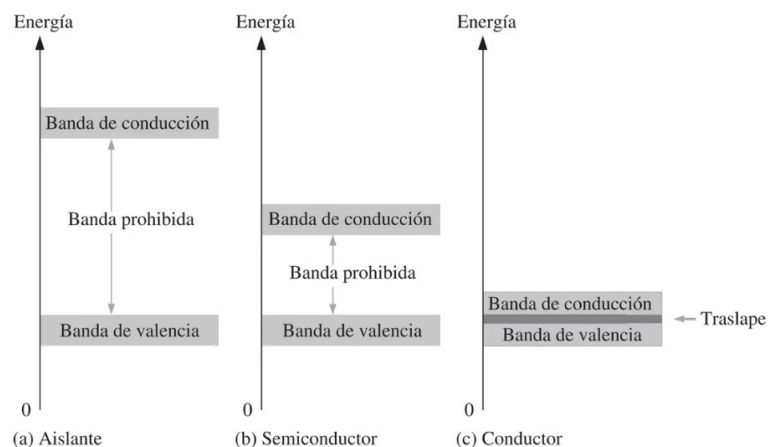


Figura 2.1: Niveles de energía para los tres tipos de materiales [12]

Existen tres niveles de energía o "bandas" en un semiconductor. El menor nivel de energía se denomina "banda de valencia" (E_V), al nivel de energía que necesita un electrón para ser considerado libre se le llama "banda de conducción" (E_C). Se le denomina "banda prohibida"

(E_G) a la diferencia entre el estado ligado y el estado libre, entre la banda de valencia y la banda de conducción. El movimiento de un electrón a la banda de conducción resulta también en un hueco en la banda de valencia. De esta manera, el electrón y el hueco participan en la conducción y se llaman "portadores". Una gran banda prohibida hará que sea más difícil para un portador ser térmicamente excitado a través de la banda prohibida. Alternativamente, el aumento de la temperatura hace que sea más probable que un electrón excitado esté en la banda de conducción, lo que aumentará la concentración de portadores intrínsecos. Esto se traduce directamente en eficiencia de la célula solar.

2.3 Unión p-n

La conductividad de los materiales usados para la fabricación de semiconductores, como el silicio y el germanio (en su estado puro), puede incrementarse drásticamente mediante la adición de impurezas. Este proceso es denominado dopado, y aumenta el número de portadores (electrones o huecos) dependiendo la aplicación deseada. Los dos portadores de impurezas son el tipo n y el tipo p [12].

Los materiales semiconductores, incluidos en la tabla periódica, están conformados por átomos individuales unidos entre sí mediante estructuras regulares de enlaces covalentes. El silicio, material base mayormente utilizado en la construcción de células solares, está compuesto por un átomo eléctricamente neutro, rodeado de 8 electrones. Cada átomo forma 4 enlaces covalentes con los 4 átomos que lo rodean. La estructura de un semiconductor se muestra en la Fig. 2.4. Los electrones que rodean al átomo no se pueden mover o participar en el flujo de corriente, por lo que no se les considera "libres". Esto cambia a temperaturas elevadas, en este estado los electrones pueden ganar suficiente energía para escapar de sus enlaces y moverse libremente por la red.

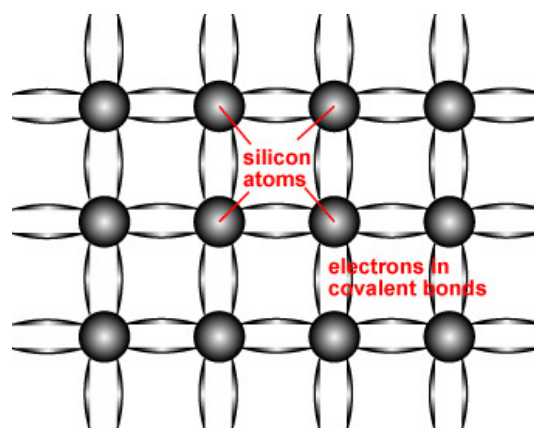


Figura 2.2: Representación esquemática de los enlaces covalentes en una red cristalina de silicio [11]

El dopaje es una técnica que se utiliza para modificar la cantidad de electrones y huecos en

un semiconductor. Por ejemplo, cuando se añaden átomos del grupo V de la tabla periódica a un semiconductor del grupo IV, se crea un material tipo N, que tiene un exceso de electrones. Por otro lado, si se añaden átomos del grupo III a un semiconductor del grupo IV, se crea un material tipo P, que tiene un exceso de huecos. Al unir un material tipo N con un material tipo P, los electrones en exceso del material tipo N se mueven hacia el material tipo P, mientras que los huecos del material tipo P se mueven hacia el material tipo N. En la región tipo N, hay una alta concentración de electrones, y en la región tipo P, hay una alta concentración de huecos. Si no tuvieran carga los electrones y los huecos, este proceso de difusión continuaría hasta que la concentración de electrones y agujeros en los dos lados fueran los mismos [11]. Los diodos de unión p-n son fundamentales para una amplia gama de dispositivos electrónicos, como las células solares, los LED, los láseres, los fotodiodos y los transistores de unión bipolar (BJTs).

Una unión p-n separa los electrones y huecos en la celda solar con el fin de producir voltaje. Las uniones p-n se forman al juntar semiconductores tipo n y tipo p. Las características de los materiales tipo n incluyen una concentración alta de electrones. De forma similar, los materiales tipo p contienen una concentración mayormente de huecos. De esta manera, al unir estos materiales se produce el movimiento de electrones, causado por el flujo electrón-hueco entre ambos. Los electrones libres en el lado n se mueven aleatoriamente en todas las direcciones; en el momento en que se forma la unión p-n, estos electrones comienzan a moverse a través de la unión de ambos materiales a la región p.

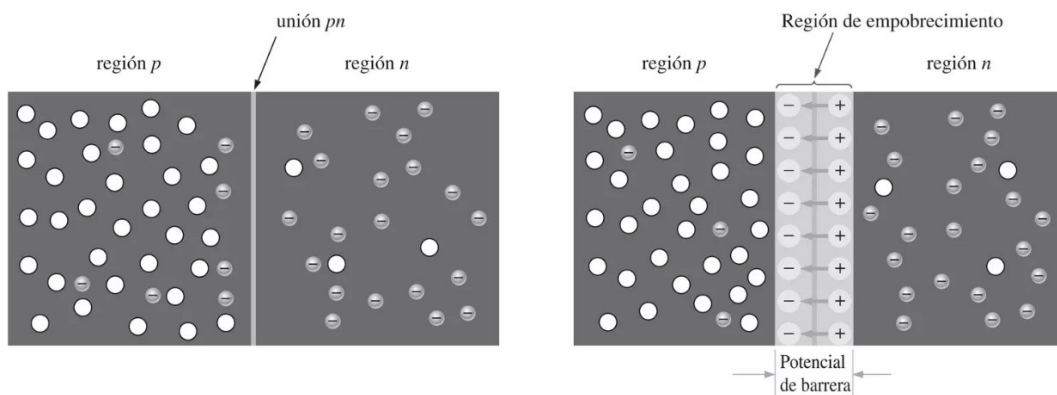


Figura 2.3: Formación de la región de empobrecimiento [12]

El movimiento de electrones hacia el lado tipo p expone núcleos de iones positivos en el lado tipo n, mientras que el movimiento de huecos para el lado tipo n expone núcleos de iones negativos en el lado de tipo p, lo que da como resultado la formación de un campo eléctrico E entre los núcleos positivos en el lado n y núcleos negativos en el lado p; este espacio es denominado "región de agotamiento", ya que el campo eléctrico conduce fuera rápidamente portadores libres, por lo tanto, la región se agota de estos portadores.

2.4 Efecto fotovoltaico

El Sol es la fuente de energía más potente que tenemos y el origen de todos los ciclos de vida en el planeta. La creciente demanda de energía alterna y distintos procesos tecnológicos hace que lo miremos desde una nueva perspectiva, como una fuente aparentemente inagotable de energía que se encuentra disponible para todos. La luz que observamos todos los días es solo una parte del total que llega a la Tierra, emitida por el Sol. La luz solar es una forma de radiación electromagnética, esta describe la luz como una onda con una longitud de onda particular.

La energía fotovoltaica es la conversión directa de la luz en electricidad. Existe una relación inversa entre la energía del fotón (E) y la longitud de onda de la luz (λ), dada por la siguiente ecuación:

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.1)$$

En donde h es la constante de Planck, c es la velocidad de la luz y $hc = 1.99 \times 10^{-25}$ julios-m Jm.

La energía solar o energía fotovoltaica obtiene su nombre del efecto fotovoltaico. Este es el proceso mediante el cual los rayos solares, la luz (foto) inciden de manera directa en células de ciertos materiales conductivos, provocando emisión de electrones y convirtiéndolos de esta manera en electricidad (voltaica). Fue el físico francés Alexandre Edmond Becquerel (1820 - 1891) quien descubrió el efecto fotovoltaico mientras experimentaba con una pila electrolítica y electrodos de platino, al observar que si se exponía a uno de los electrodos a una fuente de luz había un incremento de corriente. Posteriormente, Einstein (1879 - 1955) retomó el efecto fotoeléctrico (precedente del efecto fotovoltaico) donde sentó bases más sólidas en la explicación de este fenómeno, mismo trabajo que le llevó a recibir el Premio Nobel de Física en 1921.

A las partículas responsables de portar diferentes formas de radiación electromagnética, en este caso luz, se les denomina fotones. El flujo de estos fotones está definido como el número de fotones por segundo por unidad de área. Este es importante para determinar la cantidad de electrones que se generan, por tanto, la corriente que produce una célula solar.

Los electrones y huecos que se generan al iluminar un semiconductor se mueven de manera aleatoria dentro del material. Cada vez que un electrón encuentra un hueco, se combina con él y libera la energía previamente adquirida en forma de calor; este fenómeno se llama recombinación de un par electrón-hueco. Este proceso no es útil a menos que se logre separar los electrones y huecos, agrupándolos en diferentes zonas para crear un campo eléctrico, permitiendo que el semiconductor actúe como un generador eléctrico. Si se puede mantener esta separación y la iluminación constante, se genera una diferencia de potencial. Este proceso de convertir la luz en una diferencia de potencial se conoce como efecto fotovoltaico.

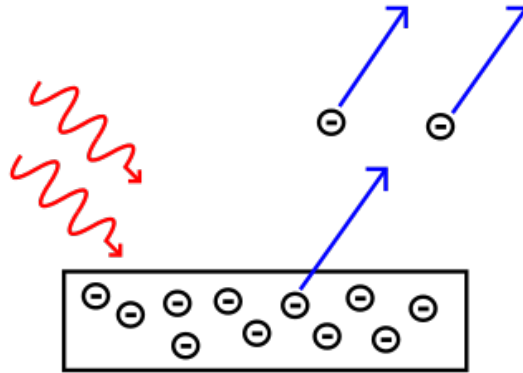


Figura 2.4: Efecto fotovoltaico [11]

El término usado para designar la energía solar que incide sobre una superficie en un momento y lugar adecuado es "irradiación solar". Cuando la irradiancia se describe como potencia, se expresa como una cantidad de watts por metro cuadrado (W/m^2). En un día claro, la irradiancia que golpea la Tierra es alrededor de $1000 W/m^2$. Sin embargo, muchos factores determinan cuanta irradiancia existe en un sitio determinado, incluyendo las condiciones atmosféricas, la posición de la Tierra con relación al Sol y las obstrucciones existentes en el sitio [13].

2.5 Celdas solares

Una célula solar es un dispositivo que convierte la luz del sol directamente en electricidad. Cuando la luz solar incide sobre la célula solar, genera una corriente y un voltaje que producen energía eléctrica. Este proceso funciona de la siguiente manera:

1. La luz solar es absorbida por un material especial dentro de la célula solar. Esta absorción excita a los electrones del material, elevándolos a un nivel de energía más alto.
2. Estos electrones de alta energía se mueven fuera de la célula solar y entran en un circuito externo, donde liberan su energía y generan electricidad.
3. Después de liberar su energía, los electrones regresan a la célula solar para repetir el ciclo.

Para que esto funcione, se utilizan materiales capaces de absorber la luz y mover los electrones. Aunque hay diferentes materiales y métodos que podrían funcionar, en la práctica, casi todas las células solares utilizan materiales semiconductores en una estructura llamada unión p-n. Esta estructura es esencial para la eficiente conversión de la luz solar en electricidad.

Una corriente eléctrica es el movimiento de electrones que ocurre cuando hay una diferencia de potencial eléctrico. Todos los materiales están llenos de electrones. Los átomos de los materiales tienen núcleos con carga positiva rodeados por electrones con carga negativa. En

ciertos materiales, es fácil que los electrones se muevan y generen una corriente eléctrica, mientras que en otros, esto es mucho más difícil o incluso imposible. Por ejemplo, en el cobre y otros metales, los electrones pueden moverse con facilidad, permitiendo la formación de circuitos por los cuales fluye la corriente eléctrica. Estos materiales se llaman conductores porque sus electrones tienen energías altas y se encuentran en una banda de energía llamada banda de conducción. [14]

Por otro lado, hay materiales donde no puede fluir la corriente eléctrica porque sus electrones no pueden moverse. Estos son los materiales aislantes, cuyos electrones están en una banda de energía llamada banda de valencia. Además, existen los semiconductores, que no son completamente conductores ni completamente aislantes. En los semiconductores, las bandas de conducción y de valencia están separadas por una banda de energía llamada banda prohibida, en la cual no hay electrones con la energía necesaria para moverse.

Cualquier forma de aporte energético, como un aumento de temperatura o la exposición a la luz, hace que algunos electrones de valencia en un semiconductor absorban suficiente energía para romper sus enlaces covalentes y desplazarse por la red cristalina, convirtiéndose en electrones libres. La cantidad mínima de energía necesaria para romper un enlace y crear un par electrón-hueco es una constante específica del material semiconductor, conocida como energía de enlace. En el caso del silicio, esta energía necesaria para generar un par electrón-hueco es de 1,12 eV. [15]

Cuando la luz del sol llega a una celda solar, puede hacer una de tres cosas: rebotar, pasar a través de la celda o ser absorbida por ella. Sin embargo, solo la luz que es absorbida puede crear electricidad. La energía de la luz absorbida se transfiere a los electrones de los átomos en la celda. Con esta nueva energía, los electrones se mueven de sus posiciones normales en los átomos del material semiconductor y se convierten en parte de la corriente eléctrica que produce la celda.

2.6 Curvas características de una celda solar

Para saber si una celda solar realiza la conversión de irradiancia solar a energía eléctrica de manera correcta y eficiente, se utilizan curvas características de la celda. Estas curvas pueden obtenerse exponiendo a la celda a distintas condiciones de irradiancia. La elaboración de las curvas características: voltaje – corriente (I-V) y voltaje – potencia (P-V), de un módulo fotovoltaico es de gran importancia para poder analizar de mejor manera su desempeño eléctrico. Con la curva I-V es posible obtener parámetros importantes respecto al comportamiento eléctrico del módulo como la corriente de corto circuito (I_{sc}), el voltaje de circuito abierto (V_{oc}), el punto de máxima potencia (MPP o P_{max}), la corriente en el punto de máxima potencia (I_m) y el voltaje en el punto de máxima potencia (V_m), como se observa en la Figura 2.6.

En donde:

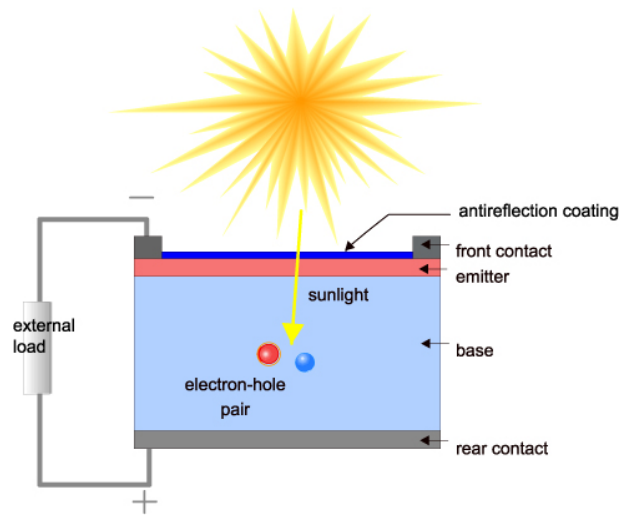


Figura 2.5: Corte transversal de una célula solar [11]

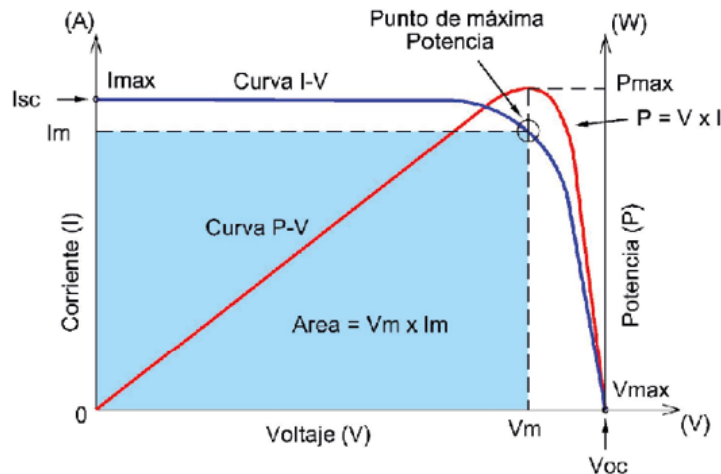


Figura 2.6: Gráficas de corriente, potencia y voltaje de una celda fotovoltaica. [16]

- La corriente de cortocircuito (I_{sc}) es la corriente a través de la célula solar cuando el voltaje es cero (es decir, cuando la célula solar está en cortocircuito). La corriente de cortocircuito es la corriente más grande que puede extraerse de la célula solar.
- De forma contraria, la tensión en circuito abierto (V_{oc}), es la tensión máxima disponible de una célula solar, y esto se produce cuando la corriente es cero.
- El punto de máxima potencia (P_{max}) es la potencia máxima que es posible extraer de la celda y depende directamente de I_{mp} y V_{mp} .
- El factor de llenado (FF) es un parámetro que junto con el V_{oc} e I_{sc} determina la potencia

máxima de una celda solar, es decir, está relacionado con la eficiencia [17].

$$FF = \frac{(I_{mp})(V_{mp})}{(I_{sc})(V_{oc})} = \frac{(P_{max})}{(I_{sc})(V_{oc})} \quad (2.2)$$

La eficiencia es el parámetro más utilizado para comparar el rendimiento de una célula solar a otra. La eficiencia se define como la relación entre la producción de energía de la célula solar y la energía que recibe del sol. Además de reflejar el rendimiento de la propia célula solar, la eficiencia depende del espectro y la intensidad de la luz solar incidente y la temperatura de la célula solar. Por lo tanto, las condiciones bajo las cuales se mide la eficiencia se deben controlar cuidadosamente con el fin de comparar el rendimiento de un dispositivo a otro. Células solares terrestres se miden en Standar Test Conditions (STC), estas incluyen los parámetros de 1.5 AM, una temperatura de 25 °C y una irradiancia de 1000 W/m². En las condiciones reales de trabajo, un módulo fotovoltaico recibirá una irradiancia menor a 1000 W/m². Por ejemplo, cuando los rayos solares no llegan perpendicularmente a su superficie o también cuando el cielo presente nubosidad.

Debido a las perturbaciones del medio ambiente, como los cambios de temperatura e irradiación, la curva de Potencia vs Voltaje no es fija y cambiará continuamente a lo largo del tiempo, por lo tanto también lo hará el MPP. Si el punto de operación no coincide con el de máxima potencia, entonces se extraerá una baja cantidad de energía de la celda. Debido a tal fenómeno, saber el comportamiento del MPPT es necesario en el rendimiento de la celda solar [18].

2.7 Modelo de un solo diodo (single diode)

Los semiconductores tienen la capacidad de absorber luz y entregar una parte de la energía de los fotones absorbidos a portadores de carga eléctrica, es decir, electrones y huecos. Un diodo semiconductor separa y colecta los portadores y conduce la corriente eléctrica generada en una dirección específica. Es decir, permite pasar la corriente eléctrica en un sentido y la bloquea en el sentido contrario. Entonces, una celda solar es un diodo semiconductor que ha sido cuidadosamente diseñado y construido para absorber eficientemente la energía de la luz del sol y convertirla en energía eléctrica. El diodo semiconductor está formado por una parte tipo n en contacto con una parte tipo p. Esto se logra mediante la implantación o difusión de impurezas específicas (dopantes) o mediante un depósito de dopantes durante el crecimiento. Conocer los parámetros de las células solares en distintas condiciones de funcionamiento es de gran importancia, ya que permite elaborar la curva I-V (corriente-tensión) del sistema fotovoltaico. Esto es fundamental para estimar el punto de máxima potencia del sistema.

Los fabricantes de células solares o paneles fotovoltaicos suelen publicar las curvas I-V bajo unas pocas condiciones específicas de funcionamiento. Algunos fabricantes, incluso,

solo proporcionan datos en algunos puntos de carga seleccionados. Afortunadamente, una célula solar puede ser representada mediante un modelo que incluye unos pocos componentes eléctricos, como se muestra en la Fig. 2.7. Generalmente, el circuito eléctrico equivalente de una célula solar está compuesto por una fuente de corriente generada por la luz solar, un diodo, una resistencia en paralelo y una resistencia en serie (que representa la resistencia interna del material al flujo de corriente). El modelo matemático de la célula solar se deriva de esta representación eléctrica y depende principalmente de la radiación solar y la temperatura de la célula.

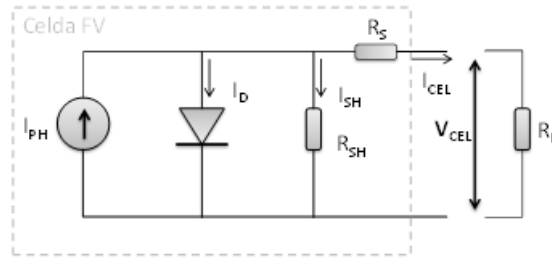


Figura 2.7: Representación eléctrica de una celda solar [17]

A partir de la información proporcionada por los fabricantes, es posible extraer los parámetros de este modelo eléctrico. Con estos parámetros, se puede estimar la relación I-V de la célula solar bajo diferentes condiciones de funcionamiento y cargas. Esto permite prever cómo se comportará la célula solar en distintas situaciones y optimizar su rendimiento en un sistema fotovoltaico.

Las ecuaciones que describen el circuito equivalente de la celda solar, son representadas de la siguiente manera:

$$I_{cel} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (2.3)$$

$$I_{cel} = I_{ph} - I_0 \left[e^{\frac{q(V+R_s I_{cel})}{nK_B T}} - 1 \right] - \frac{V + R_s I_{cel}}{R_{sh}} \quad (2.4)$$

Aplicando la ley de voltaje y corriente de Kirchoff al circuito con una iluminación dada, se puede deducir la corriente generada (I_{cel}) por el panel solar, como se muestra en las ecuaciones 2.3 y 2.4 [17] [16]. La fuente I_{ph} es la corriente fotogenerada a un valor fijo de radiación solar, I_{sh} es la corriente de fuga en la resistencia shunt, I_d es la corriente del diodo ideal. Para la ecuación 2.4, I_0 es la corriente de saturación inversa, R_s es la resistencia en serie, R_{sh} es la resistencia en paralelo, V es el voltaje, q es la carga de un electrón ($1.6 \times 10^{-19} C$). Además, K_B corresponde la constante de Boltzman ($1.38 \times 10^{-23} J/K$), T es la temperatura de la celda y n es el factor de idealidad. El factor de idealidad permite distinguir el comportamiento entre una celda de silicio y una de germanio, dependiendo así de la tecnología de fabricación de la celda solar.

2.8 Conexiones serie-paralelo

Una celda solar es un dispositivo que representa la unidad fundamental de un sistema fotovoltaico. Un panel solar es el conjunto de un determinado número de celdas solares conectadas en serie-paralelo y montadas sobre una placa metálica encapsulada por un aislante térmico. Un arreglo fotovoltaico es el conjunto de un determinado número de paneles solares conectados en serie-paralelo para la generación de una cantidad determinada de energía.

La generación de energía de una celda solar se ve afectada principalmente por la variación en la radiación solar incidente y en la temperatura de la celda. Al acoplar un conjunto de celdas solares, la energía generada aumenta linealmente debido a la variación incremental del voltaje y de corriente gracias a la configuración serie-paralelo. Una configuración en serie permitirá que el voltaje del conjunto incremente, manteniendo constante el flujo de la corriente. Por otro lado, una configuración en paralelo mantendrá un nivel de voltaje constante, incrementando el flujo de la corriente.

Un arreglo fotovoltaico está compuesto por varios módulos fotovoltaicos conectados en serie-paralelo para garantizar el voltaje y la corriente deseados. Para proteger los módulos de un punto hot-spot (con mayor temperatura), que puede ocurrir en un arreglo FV cuando solo un módulo fotovoltaico en la serie recibe menos irradiancia y disipa parte de la energía generada por el resto de los módulos, se conectan diodos de bypass en paralelo con cada módulo fotovoltaico. Además, se coloca un diodo de bloqueo en serie con cada string, que es un grupo de módulos FV conectados en serie, para proteger los módulos del efecto de la diferencia de potencial entre strings conectados en serie. Cuando la irradiancia solar sobre los arreglos fotovoltaicos es uniforme, solo se observa un único punto de máxima potencia (MPP) en la curva característica P-V del arreglo. Sin embargo, bajo condiciones de sombreado parcial (PSCs), pueden aparecer múltiples puntos de máxima potencia local debido a los diodos de bypass y de bloqueo [19].

Existen distintos tipos de conexión para sistemas fotovoltaicos (como se observa en la Fig. 2.8), y su aplicación depende del uso y capacidad instalada que se desea conseguir. Se han desarrollado diversos modelos matemáticos que describen el comportamiento de una celda solar. Todos los modelos se basan en la relación corriente-voltaje resultante de un diodo, cuya fabricación representa a los semiconductores dopados tipo n y tipo p, utilizados en la manufactura de una celda solar. En la actualidad, existen diversas plataformas computacionales en las que se puede realizar la simulación de un dispositivo fotovoltaico, basándose en su modelo matemático, por ejemplo Matlab y Virtuoso. [21]

2.9 Entendimiento de las curvas características

Los modelos eléctricos para la generación de energía fotovoltaica incluyen el modelo de diodo único (single diode), el modelo de dos diodos y el modelo de tres diodos. Se comenzó simulando

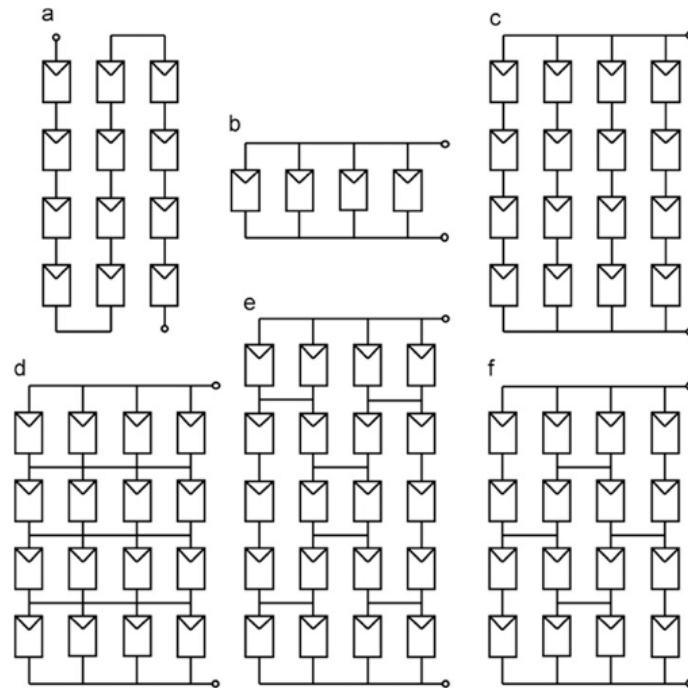


Figura 2.8: Tipos de conexión para arreglos fotovoltaicos. (a) arreglo en serie, (b) arreglo en paralelo, (c) arreglo serie-paralelo, (d) arreglo total-cross tied, (e) arreglo bridge-link y (f) arreglo honey-comb [20].

el modelo de diodo único o single diode (Fig. 2.7), ya que un diodo tiene propiedades similares a las que producen una curva I-V en una celda solar cuando no hay iluminación. Cuando el sistema recibe irradiancia, la curva I-V empieza a moverse hacia el cuarto cuadrante al recibir flujo de energía; a mayor intensidad de la luz, mayor es el movimiento en la curva [11]. Por último, la curva rota dando como resultado la curva I-V convencional mostrada en la Fig. 2.6. Este puede ser un modelo de cuatro parámetros o un modelo de cinco parámetros. Los parámetros de un modelo de cuatro parámetros incluyen la fotocorriente, la corriente de saturación, el factor de idealidad y la resistencia en serie. Este modelo no tiene en cuenta el efecto de la resistencia en paralelo y asume que dicha resistencia es infinita, por lo que la tensión en circuito abierto disminuye y no refleja totalmente la corriente de fuga para una unión P-N, lo que da lugar a una gran diferencia entre la potencia prevista y la real. Un modelo de cinco parámetros tiene en cuenta el efecto de las resistencias en paralelo, por lo que aumenta la complejidad del modelo, pero la potencia prevista es más precisa que la de un modelo de cuatro parámetros [22].

Se comenzó modelando la representación eléctrica de un solo diodo mostrado en la Figura 2.7 en la plataforma de desarrollo Cadence®Virtuoso. Para ello, se colocó una fuente de voltaje, un diodo y tres resistencias para poder obtener las curvas I-V Y P-V equivalentes, como se muestra a continuación.

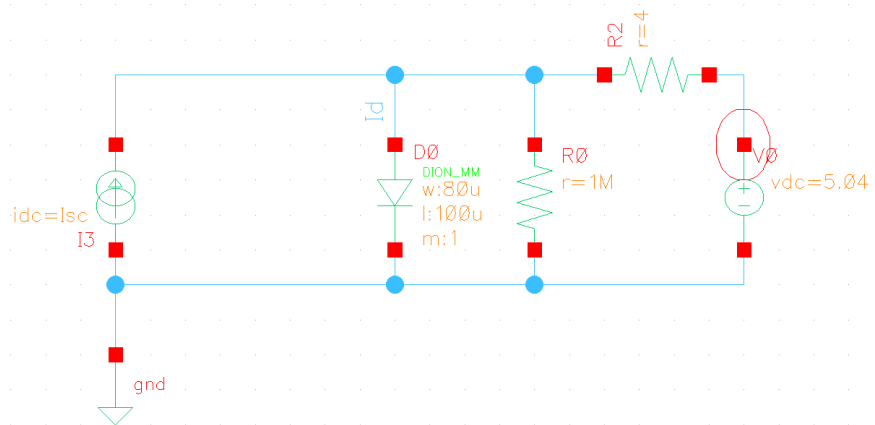
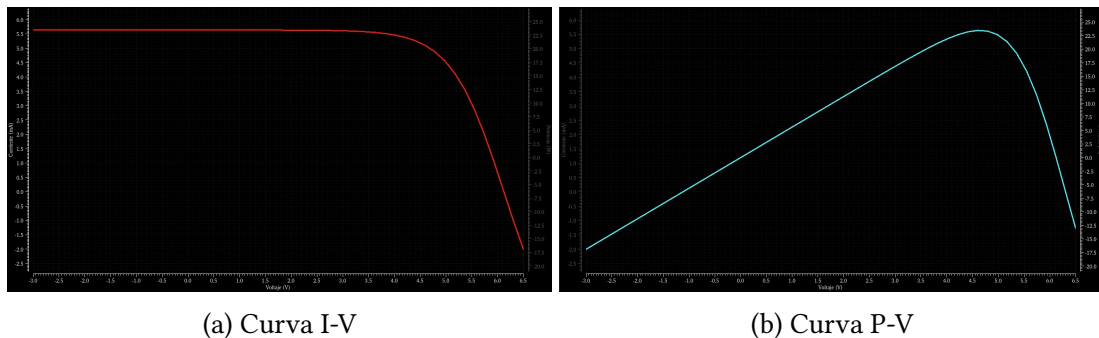


Figura 2.9: Representación eléctrica de una celda solar en Cadence®Virtuoso.

Posteriormente, se observaron las curvas características I-V y P-V correspondientes, con una corriente de entrada mínima ya que solo se realizó para la mejor comprensión del modelo.



(a) Curva I-V

(b) Curva P-V

Figura 2.10: Curvas características del modelo del diodo único.

También se realizó la medición y recolección de datos de una celda solar comercial con dimensiones de 5.6cm x 6cm usando la unidad de fuente/medida B2901A de Keysight obteniendo los parámetros bajo iluminación en laboratorio y de esta manera conseguir las curvas I-V. Posteriormente, se graficaron los datos obtenidos en Matlab para poder observar las gráficas presentadas en la Fig. 2.11

2.10 Pérdidas por desajuste

La principal fuente de pérdidas de energía en los sistemas fotovoltaicos es el sombreado parcial, que se produce cuando una parte del sistema no recibe luz directa sino a través de sombras causadas por nubes, árboles, construcciones cercanas, módulos adyacentes, etc., mientras el resto del sistema permanece iluminado directamente por el sol. Al no aprovechar el total de celdas o paneles conectados en el sistema, existen pérdidas de energía a la salida. A este tipo de

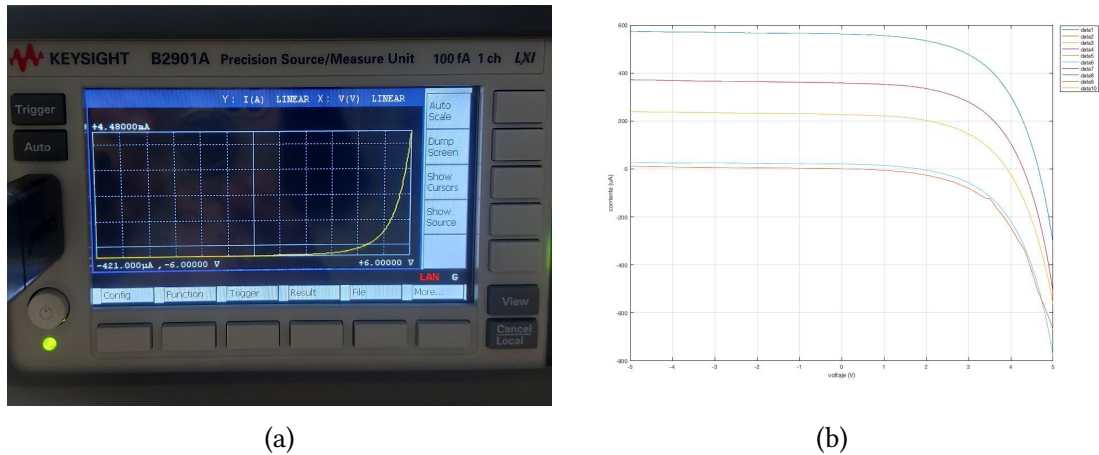


Figura 2.11: (a) Proceso de medición de curvas I-V para celda solar comercial en laboratorio, (b) Curvas I-V obtenidas en Matlab a diferentes irradiancias

pérdidas se les denomina pérdidas por desajuste o mejor conocidas por su nombre en inglés, mismatch losses.

Al conectar arreglos de celdas fotovoltaicas en serie, paralelo, o una combinación de ambas, existen factores de pérdida por desajuste o "mismatch losses" en inglés. Estas son causadas por la conexión entre celdas que no presentan los mismos parámetros o condiciones. Las pérdidas por desajuste son un problema grave en los módulos y conjuntos fotovoltaicos en determinadas condiciones, ya que la potencia de todo el arreglo fotovoltaico, en el peor escenario, estará determinada por la celda solar con la potencia más baja. Un ejemplo de ello es el sombreado, cuando una celda solar está a la sombra mientras que el resto de celdas en el arreglo no lo están, la energía generada por las celdas solares "buenas" puede ser disipada por la celda de menor rendimiento en lugar de alimentar la carga. Esto, a su vez, puede provocar una disipación de potencia y el calentamiento local resultante puede causar daños irreversibles en el módulo. Las pérdidas por desajuste en los módulos fotovoltaicos se producen cuando los parámetros eléctricos de una celda solar se alteran significativamente con respecto a los del resto del sistema. Las diferencias en cualquier parte de la curva I-V de una celda solar y otra pueden provocar pérdidas por desajuste en algún punto del funcionamiento [11].

En este escenario, existen dos categorías de pérdidas por desajuste. La primera se refiere a cuando las curvas de potencia presentan múltiples picos de los cuales solo uno es el pico global. Esto provoca que el seguidor del punto de máxima potencia (MPPT) solo detecta uno de los picos y no el pico global, dando como resultado pérdidas de energía [23]. La segunda categoría se debe a un desajuste en la potencia entre celdas fotovoltaicas conectadas en serie en donde no tienen el mismo MPPT debido a que reciben diferentes niveles de irradiancia. En este caso, no es posible obtener el punto de máxima potencia (MPPT) de todas celdas fotovoltaicas conectadas en serie ya que cada una tiene un MPP distinto. Sin embargo, estas pérdidas pueden mitigarse al adoptar técnicas avanzadas en el seguimiento del MPP, rubro que está en constante

desarrollo y evolución.

En la Fig. 2.12 se muestra un ejemplo de curvas P-V para dos módulos fotovoltaicos conectados en serie, estas curvas presentan un desajuste de potencia por lo que no son idénticas. Aunque la corriente de operación pasa por ambos módulos (representada por una línea discontinua en negro) esta cambia en ambos casos, ya que se puede obtener la potencia máxima del segundo módulo (punto B), pero no se puede extraer esta potencia del primero (punto A). A la diferencia entre la potencia extraída (punto C) y el máximo punto de potencia disponible (punto A) del primer módulo se le denomina pérdida por desajuste.

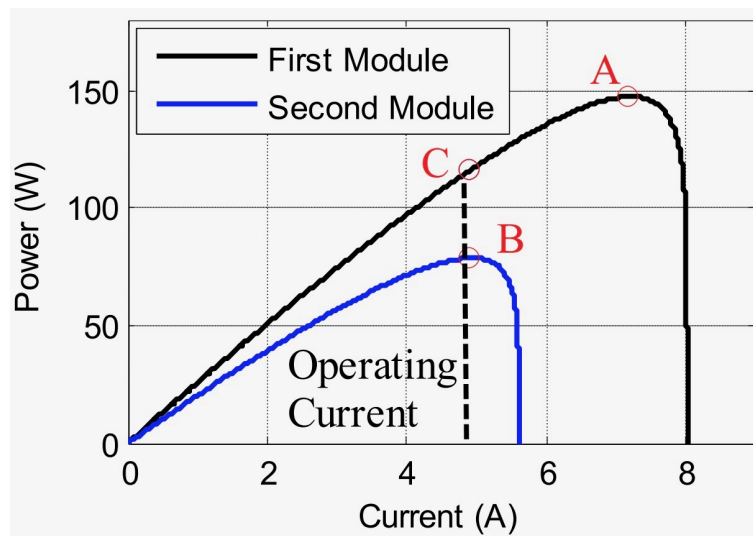


Figura 2.12: Curvas de potencia para dos módulos fotovoltaicos conectados en serie en donde el segundo módulo presenta menor potencia que el primero [23].

El tipo de pérdidas por desajuste más comunes se encuentran en conexiones en serie. De los dos tipos más simples de desajuste considerados (desajuste en corriente de cortocircuito o en tensión de circuito abierto), un desajuste en la corriente de cortocircuito es más común, ya que puede ser fácilmente causada por sombreado en el módulo. Este tipo de desajuste es también el más grave. Para dos celdas conectadas en serie, la corriente que pasa a través del circuito es la misma, dado que la corriente debe ser la misma, un desajuste en la corriente significa que la corriente total del sistema sería igual a la corriente más baja.

CAPÍTULO 3

Simulación y validación de arreglos fotovoltaicos

En el capítulo anterior, se mostró el marco teórico, el funcionamiento de una celda solar, diferentes tipos de conexión en sistemas fotovoltaicos y la descripción de las curvas características I-V y P-V. En este capítulo se muestra la forma de validar y caracterizar diferentes arreglos fotovoltaicos, la obtención de los parámetros usados y la descripción del modelo de celda solar en VerilogA. El diseño de un módulo fotovoltaico en Virtuoso es de gran importancia ya que no se tiene un modelo construido en este programa en ninguna librería. Este proceso aunque laborioso, lleva a una mayor comprensión del funcionamiento de la celda, y tiene ventajas al momento del dimensionamiento de un sistema fotovoltaico al tener más libertad al incluir los parámetros de entrada y salida que se desee; de esta manera se logra un resultado óptimo y específico. También, ofrece una base para el futuro diseño de técnicas de re configuración en Virtuoso, teniendo como enfoque las pérdidas por desajuste y sus consecuencias en la generación final de energía del sistema.

3.1 Obtención de parámetros del modelo

Para tener un mejor entendimiento del comportamiento de las curvas características del módulo fotovoltaico se realizó una simulación con la herramienta de diseño Cadence®Virtuoso. Para este fin se usa el modelo propuesto en [24], el cual toma en cuenta distintas condiciones de temperatura e irradiancia y tiene una muy buena aproximación al comportamiento eléctrico real de un módulo fotovoltaico, en este sentido, se tomará en cuenta el módulo comercial MX Solar USA MX60-220.

En la Fig. 3.1 se muestran las curvas características I-V de un módulo fotovoltaico, mismas que se han mencionado anteriormente. Aquí se observan dos regiones de operación: la primera es la región lineal donde $V_{pv} < V_{sat}$ y la segunda es la región de saturación en donde $V_{pv} > V_{sat}$, estas están divididas por un voltaje de saturación (V_{sat}). Se muestran seis curvas para tres irradiancias y dos temperaturas diferentes, las curvas en color negro son para 3 niveles de irradiancia a una temperatura T_1 , la cual es menor a T_2 y en color gris se muestran las curvas

para 3 irradiancias a una temperatura T_2 . Los puntos en V_{oc} se refieren a los valores de voltaje en circuito abierto, es decir cuando $I_{sc} = 0$, los puntos en I_{sc} son los valores de corrientes de corto circuito, cuando $V_{oc} = 0$ y los puntos I_p son las corrientes obtenidas a un cuarto del valor de V_{oc} donde $V_p = 1/4 V_{oc}$ entonces los valores de las corrientes I_p ocurren cuando el panel tiene el voltaje V_p .

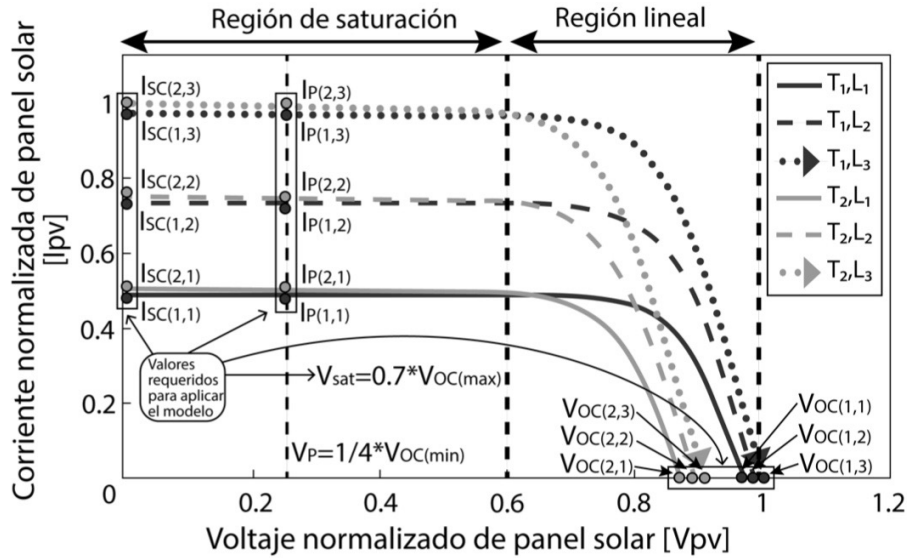


Figura 3.1: Curvas I-V correspondientes a tres niveles de irradiancia y dos de temperatura, donde las curvas negras y grises corresponden a las temperaturas T_1 y T_2 [24].

Para la construcción del modelo es necesario caracterizar las curvas I-V para tres niveles de irradiancia y dos de temperatura, en donde $L_1 < L_2 < L_3$ para la irradiancia y $T_1 < T_2$ para la temperatura. A continuación, se muestran tres matrices con los valores necesarios.

$$I_{sc(k,j)} = \begin{bmatrix} I_{sc(1,1)} & I_{sc(1,2)} & I_{sc(1,3)} \\ I_{sc(2,1)} & I_{sc(2,2)} & I_{sc(2,3)} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

$$V_{oc(k,j)} = \begin{bmatrix} V_{oc(1,1)} & V_{oc(1,2)} & V_{oc(1,3)} \\ V_{oc(2,1)} & V_{oc(2,2)} & V_{oc(2,3)} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$$I_p(k,j) = \begin{bmatrix} I_p(1,1)} & I_p(1,2)} & I_p(1,3)} \\ I_p(2,1)} & I_p(2,2)} & I_p(2,3)} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

En las ecuaciones 3.1 - 3.3 los índices (j,k) se refieren a los valores de temperatura e irradiancia.

Existe cierta incertidumbre al caracterizar las curvas características de la celda, por ello se agregan dos factores de corrección que multiplican a las matrices I_{sc} y V_{oc} , dando como resultado las siguientes ecuaciones:

$$I_{asc(j,k)} = k_1 * I_{sc} \quad (3.4)$$

$$V_{aoc(j,k)} = k_2 * V_{oc} \quad (3.5)$$

Donde k_1 y k_2 son los factores de corrección constantes. Al hacer la multiplicación de la matriz I_{sc} por k_1 se ajusta la corriente fotovoltaica del panel en la región de saturación y al multiplicar V_{oc} por k_2 se ajusta en la región lineal, estos ajustes afectan los parámetros del modelo del panel [18].

La corriente de un módulo se aproxima a través de una función tangente hiperbólica, esta contiene variables dependientes de la irradiancia y temperatura: la corriente de cortocircuito, el voltaje de circuito abierto y la conductancia en la región de saturación. Tomando en cuenta los ajustes realizados, se llega a las ecuaciones siguientes, las cuales modelan el comportamiento de la corriente en un panel.

$$I_{PV} = I_{csc} \tanh(X_1) + |G_{sat}| (V_{coc} - V_{PV}) \quad (3.6)$$

$$X_1 = K_t (V_{coc} - V_{PV}) / V_{sat} \quad (3.7)$$

Donde K_t es un coeficiente de proporcionalidad y define la curvatura en la región lineal, este valor se ajusta experimentalmente. I_{csc} , V_{coc} y G_{sat} son parámetros calculados de acuerdo a la temperatura e irradiancia. Con estos se obtiene la corriente fotovoltaica del panel I_{PV} . Para la composición del modelo se usan dos niveles de temperatura y tres de irradiancia.

Considerando este modelo se comenzó la caracterización de la simulación. Se llevó a cabo el cálculo de los parámetros a utilizar hasta llegar a los valores que se acercaron más al comportamiento real del módulo fotovoltaico de manera experimental, es decir obteniendo las curvas en un ambiente controlado variando los parámetros de irradiancia y temperatura u obteniendo los valores de la hoja de datos de un panel [18].

Los parámetros del diseño propuesto son:

- Coeficiente de proporcionalidad (kt) = 2

- Voltaje de saturación (V_{sat}) = 6 V
- Voltaje de circuito abierto mínimo ($V_{oc(min)}$) = 9 V
- Tres niveles de irradiancia (L)
 - $L1 = 600 \text{ W/m}^2$
 - $L2 = 800 \text{ W/m}^2$
 - $L3 = 1000 \text{ W/m}^2$
- Dos casos de temperatura (T)
 - $T1 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$
 - $T2 = 45 \text{ }^\circ\text{C}$
- Corriente de corto circuito I_{sc}
 - $I_{sc(1,1)} = 4.949 \text{ A}$
 - $I_{sc(1,2)} = 6.595 \text{ A}$
 - $I_{sc(1,3)} = 8.24 \text{ A}$
 - $I_{sc(2,1)} = 5.036 \text{ A}$
 - $I_{sc(2,2)} = 6.711 \text{ A}$
 - $I_{sc(2,3)} = 8.385 \text{ A}$
- Voltaje de circuito abierto V_{oc}
 - $V_{oc(1,1)} = 35.71 \text{ V}$
 - $V_{oc(2,1)} = 36.16 \text{ V}$
 - $V_{oc(3,1)} = 36.5 \text{ V}$
 - $V_{oc(2,1)} = 32.96 \text{ V}$
 - $V_{oc(2,2)} = 33.44 \text{ V}$
 - $V_{oc(2,3)} = 33.8 \text{ V}$
- Corriente de prueba I_p
 - $I_p(1,1) = 4.917$
 - $I_p(2,1) = 6.553$
 - $I_p(3,1) = 8.187$
 - $I_p(2,1) = 5.004$
 - $I_p(2,2) = 6.669$
 - $I_p(2,3) = 8.331$

3.2 Descripción del diseño de un módulo fotovoltaico

El modelo propuesto en 3.1 describe el comportamiento eléctrico de un panel solar a través de un conjunto de ecuaciones considerando la influencia de la temperatura e irradiancia. Para la descripción se requieren los voltajes y corrientes asociados a tres diferentes niveles de irradiancia y dos de temperatura los cuales se pueden obtener al hacer una caracterización de las curvas I-V de un panel de forma experimental.

Se diseñó el modelo del módulo fotovoltaico con la ayuda de la herramienta VerilogA de Cadence®, esto se hizo mediante un código con las especificaciones necesarias para un correcto funcionamiento en la simulación, incluyendo los parámetros de entrada y salida; considerando las variables de temperatura e irradiancia, así como los valores de las matrices mencionados anteriormente en la Fig. 3.1, tres niveles de irradiancia, el coeficiente de proporcionalidad y los voltajes de saturación y circuito abierto mínimo.

Es importante mencionar que se consideró usar otras plataformas de diseño como LTspice y Matlab, este último incluso cuenta con un componente especial que simula un panel solar; sin embargo, se decidió usar VerilogA como programa de diseño para realizar este trabajo ya que nos permite crear y construir el modelo de celda desde cero, comenzando con el código específico para su funcionamiento, en donde se nos da la libertad de incluir las variables mencionadas: irradiancia y temperatura, así como los valores para las matrices de las ecuaciones 3.1, 3.2 y 3.3. El código usado se presenta a continuación:

```
1  'include "constants.vams"
2  'include "disciplines.vams"
3
4  module PV_fullmodel(ia,ib,gnd,LUX,TEMP);
5  electrical ia,ib,gnd,LUX,TEMP;
6  input gnd,LUX,TEMP;
7  inout ia,ib;
8
9  parameter real kt = 2;
10 parameter real vsat = 6;
11 parameter real voc_min = 9;
12
13 parameter real L1 = 600;
14 parameter real L2 = 800;
15 parameter real L3 = 1000;
16
17 parameter real T1 = 25;
18 parameter real T2 = 45;
19
20 parameter real isc11 = 1;
21 parameter real isc12 = 1;
22 parameter real isc13 = 1;
23 parameter real isc21 = 1;
24 parameter real isc22 = 1;
```

```

25 parameter real isc23 = 1;
26
27 parameter real voc11 = 1;
28 parameter real voc12 = 1;
29 parameter real voc13 = 1;
30 parameter real voc21 = 1;
31 parameter real voc22 = 1;
32 parameter real voc23 = 1;
33
34 parameter real ip11 = 1;
35 parameter real ip12 = 1;
36 parameter real ip13 = 1;
37 parameter real ip21 = 1;
38 parameter real ip22 = 1;
39 parameter real ip23 = 1;
40
41 real L,T,vpv;
42 real msc_T1,msc_T2,Dmsc,msc_0C,msc_T,isc;
43 real mmoc,voc_0C_L1,voc_0C_L2,voc_0C_L3,S1,S2,S3,S4, mLprima,mvoc_0C_Lprima,
44   b,aprima,a,voc_0C_L,voc;
45 real gsat11,gsat12,gsat13,gsat21,gsat22,gsat23,mgs1,mgs2,mgs3,
46   Y1,Y2,Y3,Y4,mgsat,gsat_0W,gsat;
47 real X1,ipv;
48
49 analog begin
50
51 L = 1000*V(LUX,gnd);
52 T = 100*V(TEMP,gnd);
53 vpv = V(ia,ib);
54
55 //short circuit current
56 msc_T1 = (isc13 - isc11)/(L3 - L1);
57 msc_T2 = (isc23 - isc21)/(L3 - L1);
58 Dmsc = (msc_T1 - msc_T2)/(T1 - T2);
59 msc_0C = msc_T1 - Dmsc*T1;
60 msc_T = msc_0C + Dmsc*T;
61
62 isc = msc_T*L;
63
64 //open circuit voltage
65 mmoc = ((voc11 - voc21) + (voc12 - voc22) + (voc13 - voc23))/(3*(T1 - T2));
66 voc_0C_L1 = voc11 - mmoc*T1;
67 voc_0C_L2 = voc12 - mmoc*T1;
68 voc_0C_L3 = voc13 - mmoc*T1;
69 S1 = log(L1)*log(voc_0C_L1) + log(L2)*log(voc_0C_L2) + log(L3)*log(voc_0C_L3
70 );
71 S2 = log(L1) + log(L2) + log(L3);
72 S3 = log(voc_0C_L1) + log(voc_0C_L2) + log(voc_0C_L3);
73 S4 = (log(L1)**2) + (log(L2)**2) + (log(L3)**2);
74 mLprima = S2/3;
75 mvoc_0C_Lprima = S3/3;
76 b = (3*S1 - S2*S3)/(3*S4 - S2**2);

```

```

75  aprima = mvoc_0C_Lprima - b*mLprima;
76  a = 10**aprima;
77  voc_0C_L = a*(L**b);
78
79  voc = voc_0C_L + mmoc*T;
80
81  //saturation conductance
82  gsat11 = (-4*(isc11 - ip11))/voc_min;
83  gsat12 = (-4*(isc12 - ip12))/voc_min;
84  gsat13 = (-4*(isc13 - ip13))/voc_min;
85  gsat21 = (-4*(isc21 - ip21))/voc_min;
86  gsat22 = (-4*(isc22 - ip22))/voc_min;
87  gsat23 = (-4*(isc23 - ip23))/voc_min;
88  mgs1 = (gsat11 - gsat21)/2;
89  mgs2 = (gsat12 - gsat22)/2;
90  mgs3 = (gsat13 - gsat23)/2;
91  Y1 = 3*( L1*mgs1 + L2*mgs2 + L3*mgs3 );
92  Y2 = L1 + L2 + L3;
93  Y3 = mgs1 + mgs2 + mgs3;
94  Y4 = 3*( (L1**2) + (L2**2) + (L3**2) );
95  mgsat = (Y1 - Y2*Y3)/(Y4 - Y2**2);
96  gsat_0W = (Y3 - mgsat*Y2)/3;
97
98  gsat = gsat_0W + mgsat*L;
99
100 //argument of hyperbolic tangent funtion
101 X1 = kt*((voc-vpv)/vsat);
102
103 //solar cell current
104 ipv = isc*tanh(X1) + abs(gsat)*(voc - vpv);
105 I(ib,ia) <+ ipv;
106
107 end
108
109 endmodule

```

Listing 3.1: Código en VerilogA del módulo fotovoltaico usado para la simulación

En este código se calculan la corriente de cortocircuito, el voltaje de circuito abierto y la conductancia en la región de saturación; estas variables dependen de la irradiancia y temperatura que incida en el módulo y se aproximan a través de una función tangente hiperbólica. Con estos parámetros se obtiene la corriente fotovoltaica del panel. Se hicieron varios cambios y propuestas antes de llegar al script final, ya que se tuvieron obstáculos en su realización donde no se obtuvieron los resultados esperados, sin embargo, después de una amplia revisión bibliográfica se llegó al código presentado, el cual muestra un funcionamiento muy cercano al de un módulo fotovoltaico real.

Posteriormente se creó un símbolo con los pines de entrada y salida (LUX, TEMP, ia, ib, gnd) usando el script descrito anteriormente, de esta manera es posible simular el modelo y obtener las curvas características. En las líneas 50 y 51 del código, la variable correspondiente

a irradiancia (L) es multiplicada por 1000 y el valor de la temperatura (T) se multiplica por 100. Esto significa que al usar el símbolo de celda solar y ajustar los parámetros de L y T, es necesario dividir el valor que se quiera aplicar entre 1000 y 100, respectivamente. Por ejemplo, para condiciones STC (standard test conditions) las cuales son de 1000 W/m^2 y 25°C para dichas variables, se digitan los valores de entrada 1 y 0.25, respectivamente. Este símbolo se guardó en la carpeta correspondiente en el programa para su uso futuro y puede apreciarse en la Fig. 3.2.

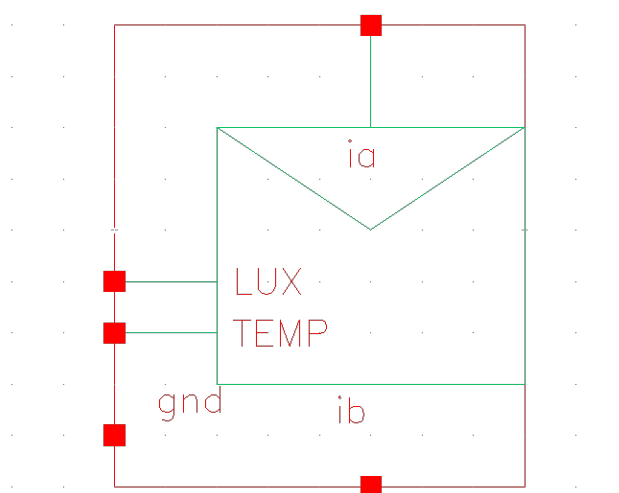


Figura 3.2: Módulo fotovoltaico en Cadence®Virtuoso.

Una vez que se obtuvo el modelo base del módulo para la simulación, se usó la herramienta Cadence®Virtuoso para obtener las curvas I-V y P-V con una misma temperatura de 25°C a distintas irradiancias: 100 (en color naranja), 200 (morado), 400 (azul cielo), 600 (rosa), 800 (verde) y 1000 W/m^2 (rojo), estas se presentan en orden ascendente aumentando cada vez más el valor en la corriente de cortocircuito I_{sc} en el eje y, y manteniendo valores cercanos en el voltaje de circuito abierto V_{oc} en el eje x, mostrando un comportamiento adecuado al que se espera en un módulo fotovoltaico comercial; como se observa en las Fig. 3.3a y 3.3b.

Así mismo, se obtuvieron las curvas características para diferentes niveles de temperatura, manteniendo ahora el mismo valor para la irradiancia de 1000 W/m^2 . Las temperaturas variables son: 5 (en color naranja), 15 (morado), 25 (azul cielo), 35 (rosa), 45 (verde) y 55°C (rojo). En este caso se observa que la corriente de cortocircuito I_{sc} mantiene un valor similar en los seis casos en el eje y, y el voltaje de circuito abierto V_{oc} aumenta cada vez más en el eje x.

Estas gráficas demuestran que existe una gran dependencia de la irradiancia y temperatura con respecto al rendimiento de la celda solar. Vale la pena señalar que la temperatura generalmente cambia bastante lentamente, por lo que el valor de la temperatura a menudo se considera una constante con respecto a la variación a la que se puede someter el nivel de irradiancia durante el día. La variación de irradiancia tiene efectos duales sobre las

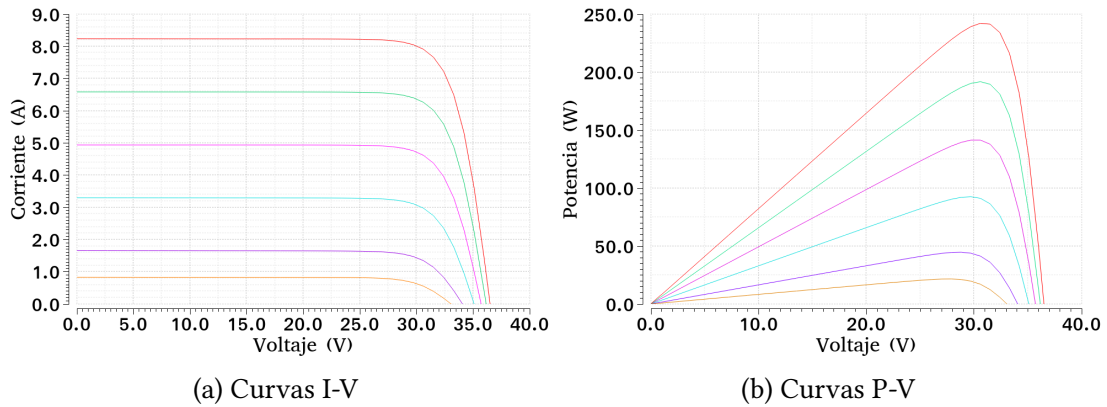


Figura 3.3: Curvas para diferentes niveles de irradiancia en W/m^2 a una temperatura de $25\text{ }^\circ\text{C}$.

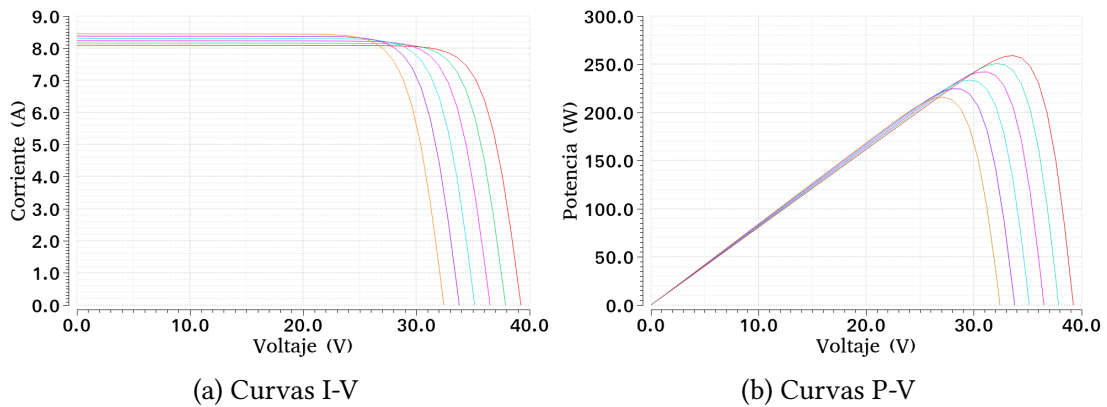


Figura 3.4: Curvas para diferentes niveles de temperatura a una irradiancia de $1000\text{ }W/m^2$.

características eléctricas con respecto a la temperatura. El voltaje de circuito abierto del módulo fotovoltaico es casi independiente de la irradiancia: en la literatura se afirma que dicha dependencia es logarítmica [18]. Por el contrario, la corriente de cortocircuito depende linealmente de la irradiancia.

Las especificaciones finales de la celda fotovoltaica presentada a condiciones STC (standard test conditions) es decir, irradiancia $L = 1000\text{ }W/m^2$ y temperatura $T = 25\text{ }^\circ\text{C}$ se presentan en la Tabla 3.1

Para validar el modelo, retomamos la publicación de IEEE [25], en este artículo se trabaja con el módulo solar MX Solar USA MX60-220 y se obtienen las curvas características equivalentes, mostrando parámetros similares en este trabajo de tesis. Las curvas características de este módulo se muestran en la Fig. 3.6

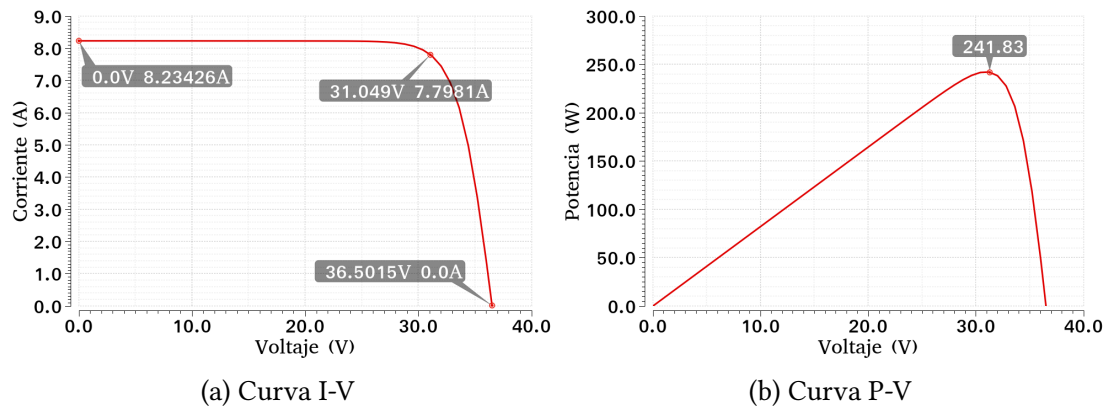


Figura 3.5: Curvas características mostrando los valores para las especificaciones del módulo fotovoltaico a STC.

Módulo	
Potencia máxima P_{max}	241.83 W/m^2
Voltaje de circuito abierto V_{oc}	36.5 V
Corriente de cortocircuito I_{sc}	8.23 A
Voltaje en MPPT V_{mp}	31.04 V
Corriente en MPPT I_{mp}	7.79 A

Table 3.1: Especificaciones del módulo fotovoltaico a STC

3.3 Conexión serie-paralelo

Una vez validado el modelo, se procede a realizar conexiones de este módulo en serie y paralelo, se realiza un sistema de cuatro por cuatro en donde se colocan dos módulos en serie y estos a su vez, son conectados con otra rama en paralelo, como se observa en la Fig. 3.8. Esto es con el propósito de validar el correcto funcionamiento en el modelo, ya que de acuerdo a las reglas en un arreglo fotovoltaico, las conexiones en serie permiten la suma del voltaje en el punto de máxima potencia de ambos módulos y el valor de la corriente se mantiene; por el contrario, las conexiones en paralelo entregan la suma de corriente y el voltaje se mantiene. De esta manera, se espera ver este cambio reflejado al simular la conexión de cuatro módulos de la Fig. 3.8.

Para un solo módulo con una irradiancia de $1000 W/m^2$ y una temperatura de $25^\circ C$ los valores en el punto de máxima potencia (MPPT) en la curva corriente voltaje (I-V) son $I_{mp} = 7.79 A$ y $V_{mp} = 31.04 V$. Estos valores se multiplican como lo marca la ecuación 3.8 para obtener la potencia en el MPPT de la curva potencia-voltaje ($P - V$), la cual es de $241.83 W/m^2$.

$$P = V \times I \quad (3.8)$$

Si se conectan dos módulos con los mismos parámetros en serie, la teoría dicta que se espera

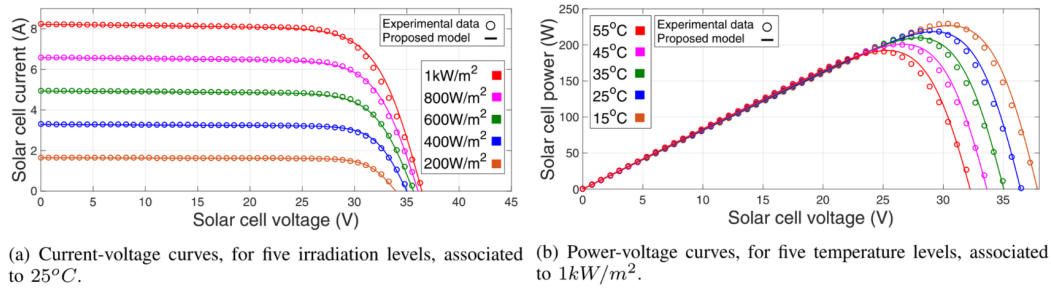


Figura 3.6: Curvas características del módulo solar MX Solar USA MX60-220.

la suma del voltaje de ambas celdas y la corriente permanece con el mismo valor, por lo tanto dos celdas conectadas en serie entregarían 62.06 V y el mismo valor en corriente de 7.79 A. Si estos, a su vez, son conectados en paralelo a otra rama en serie, se espera que el voltaje permanezca igual y se suma la corriente de ambas ramas en serie. Por lo tanto, el sistema mostrado en la Fig. 3.8 entrega 15.6 A y 62.06 V. Es importante recalcar que los valores para tomar en cuenta al simular son I_{mp} y V_{mp} . Esto se validó posteriormente en Virtuoso en donde se obtuvieron las curvas características para ambos casos: un solo módulo y el arreglo serie-paralelo con cuatro módulos, como se observa en la Fig. 3.7

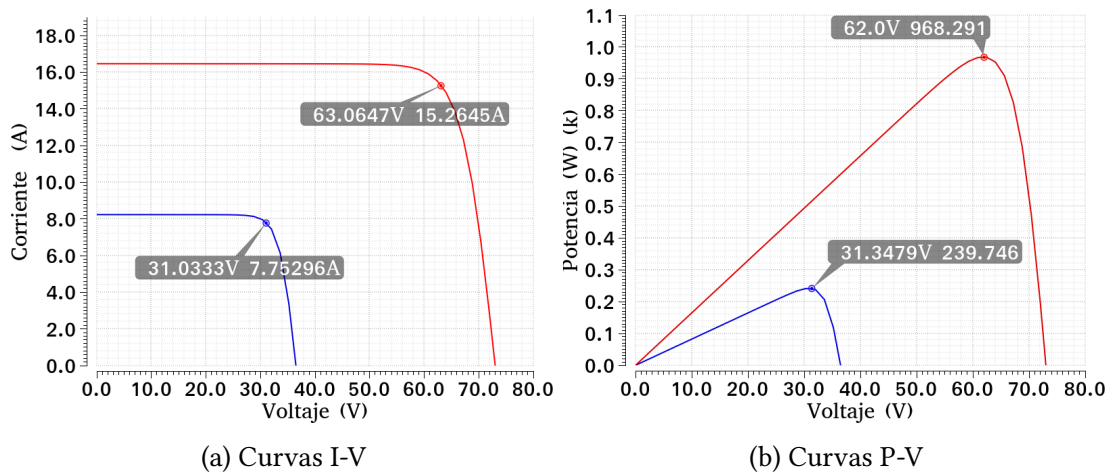


Figura 3.7: Curvas características correspondientes a un solo módulo (azul) y al arreglo serie paralelo con cuatro módulos (rojo).

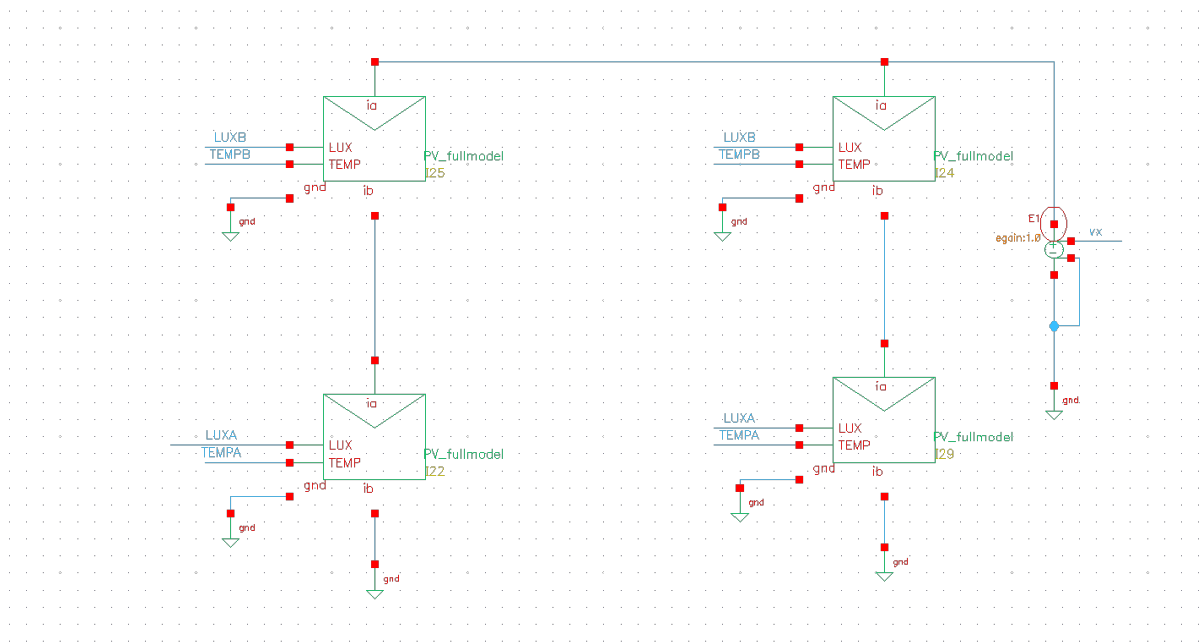


Figura 3.8: Arreglo serie-paralelo con cuatro módulos fotovoltaicos.

CAPÍTULO 4

Resultados de simulación comportamental

Una vez validado el correcto funcionamiento del módulo fotovoltaico en Virtuoso en el Capítulo anterior, se continúa con la simulación de un símbolo denominado "módulo unitario", el cual contiene en su interior dos módulos conectados entre sí mediante tres interruptores con el propósito de que el usuario pueda cambiar la conexión a serie o paralelo dependiendo la aplicación y cantidad de energía que se desea producir. Esto es útil ya que el problema de las pérdidas por desajuste (mismatch losses en inglés) puede reducir la generación de energía directamente en un sistema fotovoltaico, así como afectar los algoritmos de seguimiento del punto de máxima potencia (MPP) al provocar múltiples picos en las curvas características. Por lo tanto, las técnicas de re configuración de matrices fotovoltaicas han ganado popularidad para minimizar los efectos causados por estas pérdidas. Se presenta el diseño del módulo unitario que permite una mejora en este aspecto, maximizando así la generación de energía del conjunto fotovoltaico [26]. Se muestran las curvas características de diferentes escenarios cambiando las variables de irradiancia y temperatura, así como los resultados obtenidos de la simulación en las distintas pruebas del módulo unitario al cambiar el tipo de conexión.

4.1 Modelo del interruptor.

En esta sección se describe el modelo comportamental del switch o interruptor, ya que es necesario para el diseño de un módulo unitario que permitirá el cambio de conexión entre ambas celdas a serie o paralelo. Para hacerlo, el primer paso es escribir el script. Se comenzó con el código en VerilogA en donde un comando *if* nos permite cambiar de valor entre 0 a 1 y así "abrir" o "cerrar" el circuito. El script del switch es el siguiente:

```
1
2   'include "constants.vams"
3   'include "disciplines.vams"
4
5 module switch (A,B,ck);
```

```

6 inout A,B;
7 input ck;
8 electrical A,B,ck;
9
10 parameter real Vth = 0.5;
11 parameter real Rmin = 0.01;
12 parameter real Rmax = 1e9;
13 real R;
14
15 analog begin
16
17     if (V(ck) > Vth)
18         R = Rmin;
19     else
20         R = Rmax;
21
22
23     V(A,B) <+ I(A,B)*R;
24
25 end
26 endmodule

```

Listing 4.1: Código en VerilogA del switch usado en el diseño del módulo unitario

Una vez descrito el código, en Virtuoso se crea el siguiente símbolo que representa el switch. Este incluye los puertos bidireccionales A, B y el control con el puerto de entrada ck.

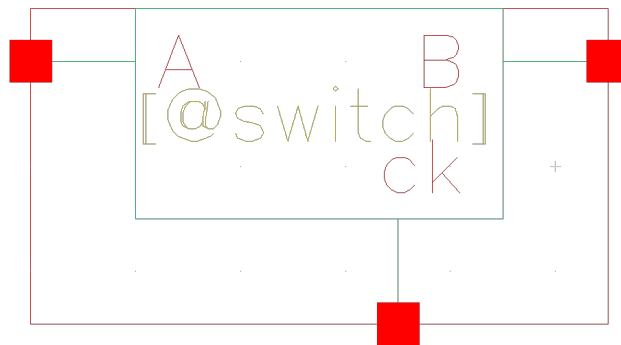


Figura 4.1: Símbolo del switch en Virtuoso.

4.2 Módulo unitario

Ahora que se tiene el switch disponible, se comenzó con el diseño del "módulo unitario", el cual incluye dos módulos fotovoltaicos con sus respectivos puertos de entrada/salida y tres interruptores o switches que permiten cambiar la conexión a serie o paralelo entre ambas celdas. Se llegó a la conclusión, en conjunto con el asesor de tesis, de que son necesarios tres



Figura 4.2: Estados del switch.

switches de forma experimental, es decir, se realizaron diversos escenarios y el más óptimo y eficiente fue utilizar solo tres switches. Al ser tres interruptores es posible obtener hasta ocho configuraciones distintas con cinco resultados finales diferentes: cortocircuito, solo energía en el módulo 1, solo energía en el módulo 2, conexión en serie y conexión en paralelo, como se aprecia en la Tabla 4.1. En la Fig. 4.3a se puede apreciar la vista interna del módulo unitario con los componentes necesarios para su funcionamiento, y en la Fig. 4.3b se observa el símbolo del módulo unitario con sus respectivos puertos de entrada y salida.

Módulo unitario			
Switch 1	Switch 2	Switch 3	Resultado
1	1	1	Cortocircuito
0	0	0	Circuito abierto
1	0	0	Solo módulo 1
1	1	0	Solo módulo 1
0	1	1	Solo módulo 2
0	0	1	Solo módulo 2
0	1	0	Serie
1	0	1	Paralelo

Table 4.1: Conexiones posibles en módulo unitario

El símbolo del módulo unitario contiene dos puertos de entrada/salida (B, A), dos puertos para cambiar las variables de temperatura de cada celda (T1, T2), dos para la irradiancia de cada celda (L1, L2), el puerto a tierra (GND) y tres puertos para poder cambiar los valores de los interruptores a 0 (abierto) y 1 (cerrado), de esta manera es posible cambiar la configuración en la conexión entre ambos paneles (S1, S2, S3). En la Fig. 4.4 se muestra la configuración final para un módulo unitario con el caso 010 en los puertos S1, S2 y S3 respectivamente, es decir, en serie.

4.2.1 Prueba eléctrica en condiciones de medida estándar (STC)

En esta sección se exploraron las distintas configuraciones de conexión en el simulador de Virtuoso para validar su correcto desempeño a condiciones STC (Standar Test Condition, por sus siglas en inglés). Para ello se realizaron dos escenarios: en el primero se conectaron dos

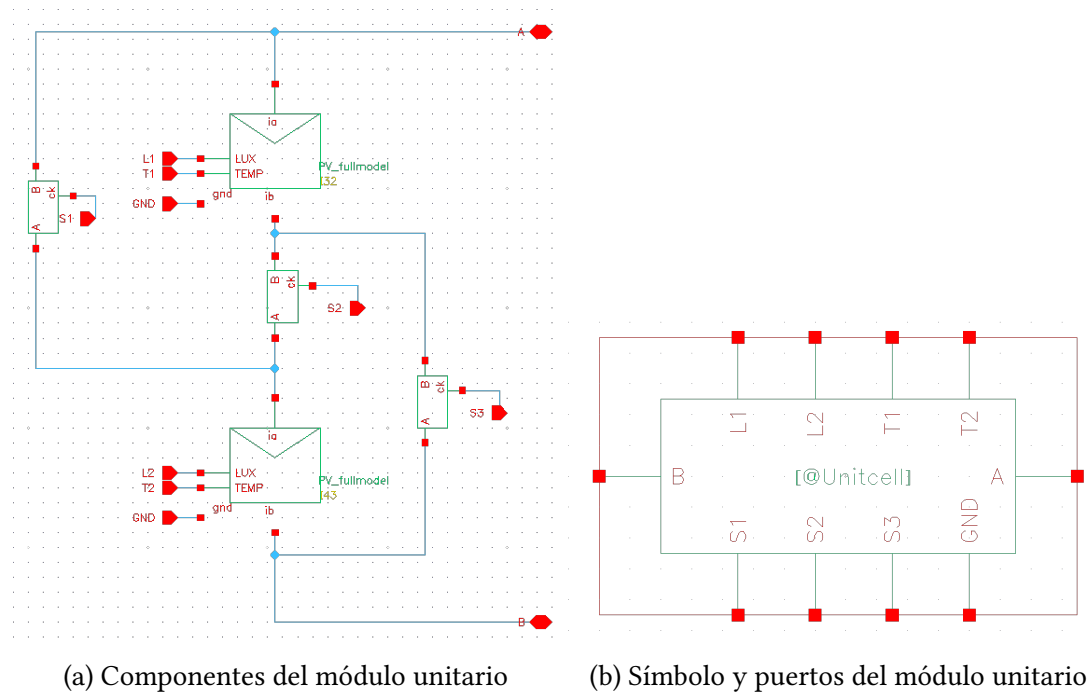


Figura 4.3: Módulo unitario

módulos unitarios en paralelo y en el segundo se repitió el procedimiento pero ahora se hizo la conexión entre ambos en serie. Para ambos escenarios se muestran resultados variando los valores de los interruptores entre 0 (abierto) y 1 (cerrado).

Los resultados obtenidos se muestran a continuación mediante los circuitos en Virtuoso, la obtención de las curvas características para cada caso y sus especificaciones en tablas. En las Fig. 4.6a y 4.6b, se simularon las curvas I-V y P-V para los tres casos posibles explicados a continuación:

1. El primer caso muestra las conexiones posibles al cambiar los tres interruptores del módulo unitario a los siguientes valores: 100, 110, 011 y 001; los cuales tienen la misma curva I-V ya que solo simulan la celda 1 o la celda 2 por separado y al tener las mismas variables de entrada, el valor de la potencia que entregan es igual, las curvas características para estos casos se muestran en color amarillo.
2. Para el caso 010 el circuito está en serie y las curvas características resultantes se presentan en color verde; en este caso se observa el incremento al doble en el voltaje y la corriente se mantiene igual. Las especificaciones para este caso se muestran en la tabla 4.2.
3. En el caso 101 el circuito está en paralelo y se muestra en color rojo, en este escenario la corriente de ambas celdas se suman y el voltaje mantiene el mismo valor. Las especificaciones para este caso se muestran en la tabla 4.2.

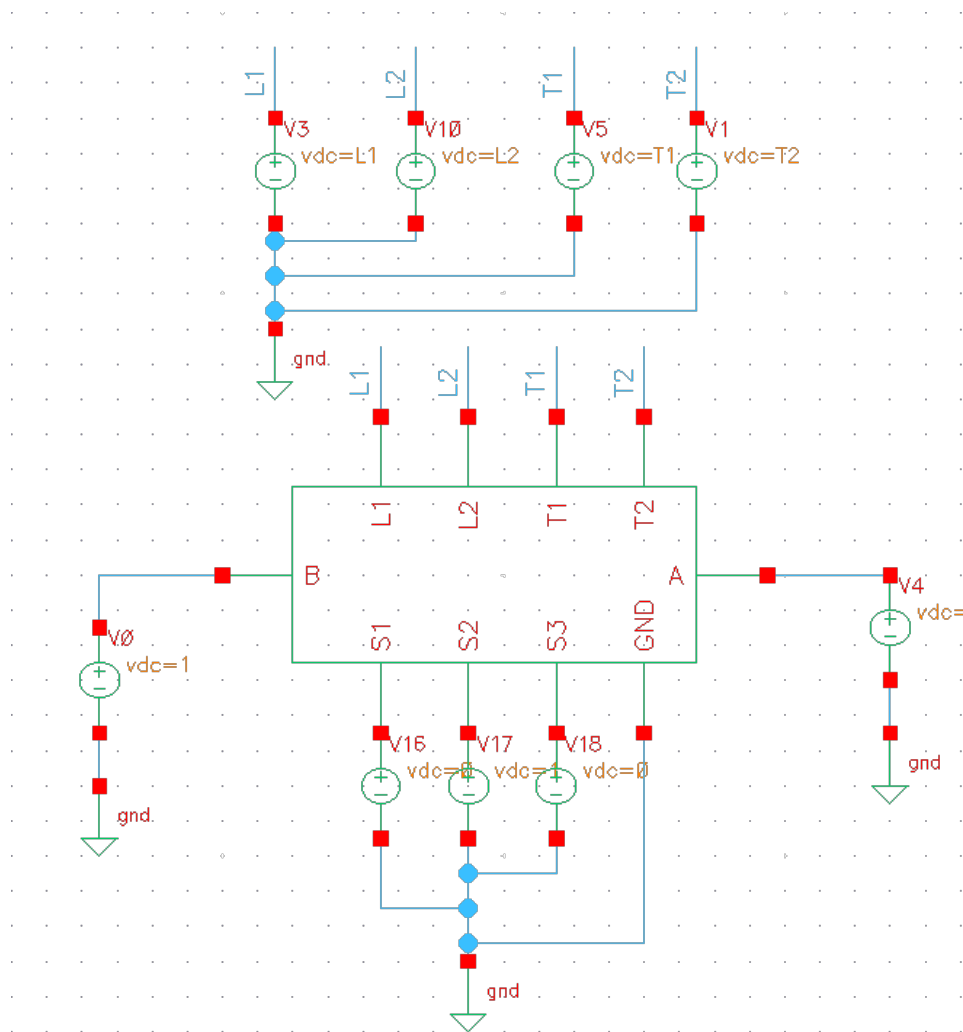


Figura 4.4: Símbolo del módulo unitario en Virtuooso con el caso 010 en serie.

Se observa que estas curvas son las mismas obtenidas en el capítulo anterior en la sección "Descripción del modelo" en donde se estudiaron los valores entregados de un módulo fotovoltaico en condiciones STC, por lo que este caso se valida. En la curva mostrada en color rojo, en donde los switches tienen una configuración 010 en serie, se espera que el voltaje de ambas celdas se sume y la corriente se mantenga constante, esto se ve reflejado en ambas curvas I-V y P-V. Asimismo, la curva en color verde muestra la salida del circuito cuando se tiene una configuración 101, lo que indica una conexión en paralelo entre ambos módulos dentro del módulo unitario. En este caso se espera que la corriente se sume y el voltaje se mantenga igual, esto se valida en ambas curvas características. De esta manera se corrobora el funcionamiento adecuado del modelo de la celda unitaria en condiciones STC. Estos resultados se pueden observar en la Fig. 4.6

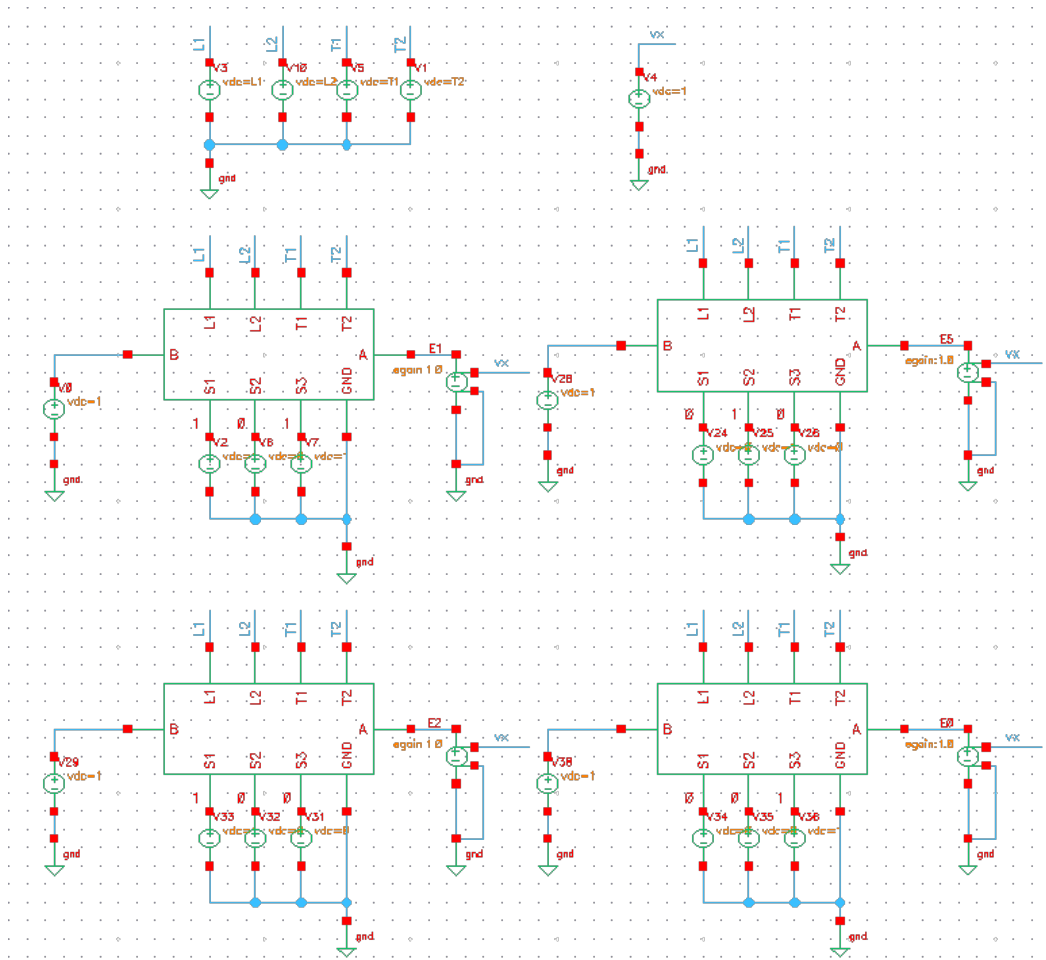
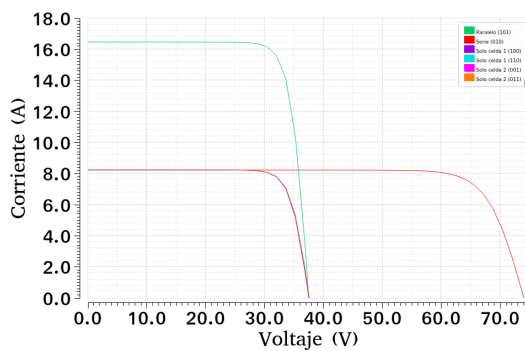
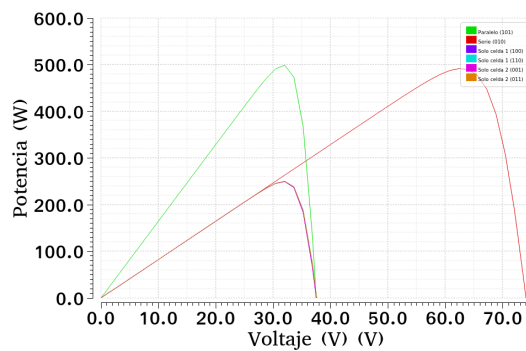


Figura 4.5: Circuito en Virtuoso para los casos en serie 010, paralelo 101 y solo celda uno 100 o celda dos 001.



(a) Curvas I-V



(b) Curvas P-V

Figura 4.6: Curvas características para combinaciones posibles en el módulo unitario a condiciones STC.

Módulo unitario		
Parámetros	Serie	Paralelo
Potencia máxima P_{max}	491.4 W/m ²	498.64 W/m ²
Voltaje de circuito abierto V_{oc}	74 V	37.5 V
Corriente de cortocircuito I_{sc}	8.23 A	16.46 A
Voltaje en MPP V_{mp}	63 V	31.5 V
Corriente en MPP I_{mp}	7.8 A	15.83 A

Table 4.2: Especificaciones del módulo unitario a STC

4.2.2 Prueba eléctrica en condiciones variables

En la sección anterior, "3.2 Descripción del modelo", se presentaron distintas curvas características variando la irradiancia y temperatura, sin embargo, ese caso solo tomó en cuenta un solo módulo, antes de la creación del arreglo de módulo unitario. En esta sección se realizaron simulaciones explorando el modelo de celda unitaria con distintas irradiancias y temperaturas, variando el modo de conexión y observando los cambios de estas distintas configuraciones en las curvas características I-V y P-V, la curva característica en cada caso será diferenciada por el color. Se toma en cuenta el mismo circuito de la Fig. 4.5 el cual nos permite observar las curvas características que se obtienen al simular los seis casos posibles: conexión en serie (010), conexión en paralelo (101), solo celda 1 (100 y 110) o solo celda 2 (001 y 011).

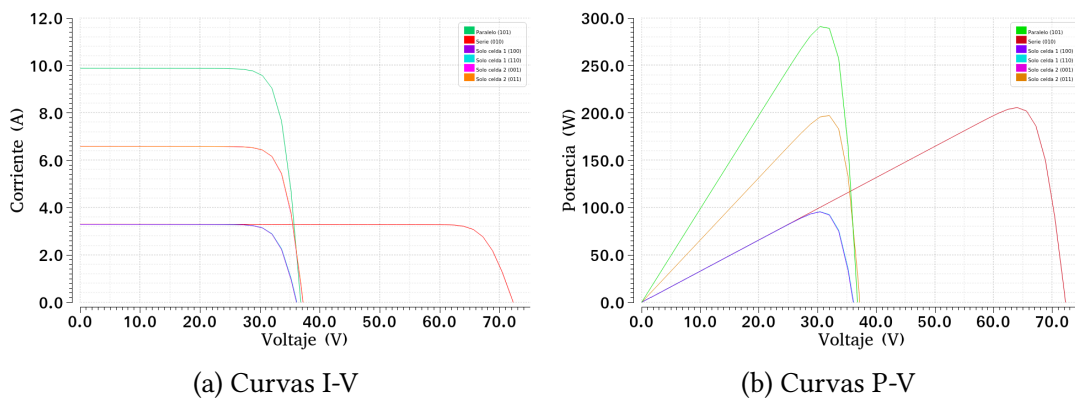


Figura 4.7: Curvas características para serie (rojo), paralelo (verde), solo celda 1 (morado y azul cielo) y solo celda 2 (naranja y rosa) cuando la irradiancia tiene valores de 800 y 400 W/m^2 .

Se comenzó cambiando el valor de la irradiancia pero manteniendo la temperatura estándar de 25°C para T1 Y T2. Los parámetros de irradiancia para esta prueba son: para la irradiancia del primer módulo $L1 = 800 \text{ W/m}^2$ y para la irradiancia del segundo módulo $L2 = 400 \text{ W/m}^2$, los resultados se observan en la Fig. 4.7. Se observa un cambio en la corriente, la cual es menor para los cuatro casos considerando la sección anterior con condiciones STC. También se observa un cambio entre las curvas para la celda 1 y las de la celda 2, siendo esta última la que tiene mayor corriente de cortocircuito I_{sc} de ambas. Para la celda 2 se tiene una irradiancia de $L2 = 400 \text{ W/m}^2$ por lo que se puede concluir que en este modelo, a menor irradiancia, mayor es la corriente. En el caso de la conexión en serie y paralelo, se observa un resultado similar comparado al obtenido a condiciones STC, en donde el voltaje de ambos módulos se suma para la conexión en serie, y la corriente se duplica para la conexión en paralelo, sin embargo al variar la irradiancia I_{sc} , V_{oc} y P_{max} disminuyen.

En el segundo escenario se mantuvo la misma irradiancia de 1000 W/m^2 para L1 y L2, pero se consideraron parámetros variables para la temperatura, en donde $T1 = 15^\circ\text{C}$ y $T2 = 45^\circ\text{C}$. Se observa un incremento en todos los casos en I_{sc} comparado al caso anterior, por lo que a

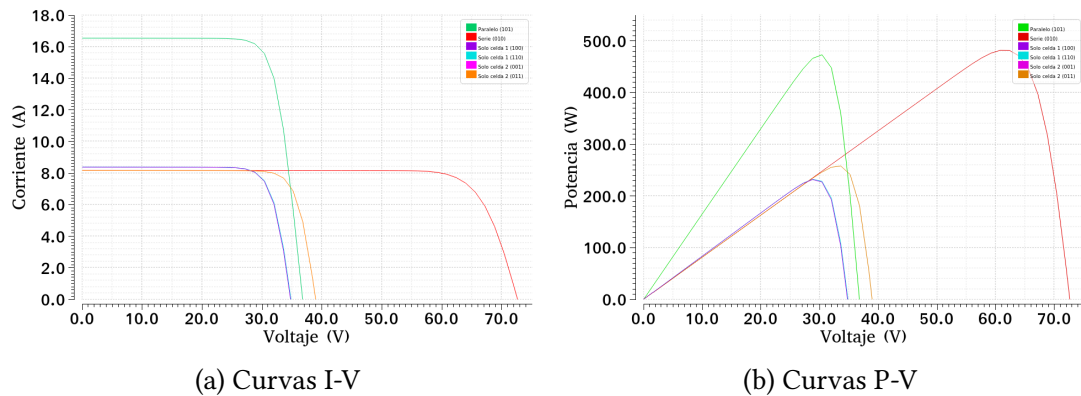


Figura 4.8: Curvas características para serie (rojo), paralelo (verde), solo celda 1 (morado y azul cielo) y solo celda 2 (naranja y rosa) cuando la temperatura tiene valores de 15 y 45 °C.

mayor temperatura, mayor corriente de cortocircuito. También se observa un cambio en el voltaje de circuito abierto V_{oc} en la conexión en paralelo, para el módulo 1 y para el módulo 2, en donde hay un incremento de alrededor de 4 V aproximadamente. Para la conexión en serie y paralelo, el comportamiento de las curvas es similar al de casos anteriores.

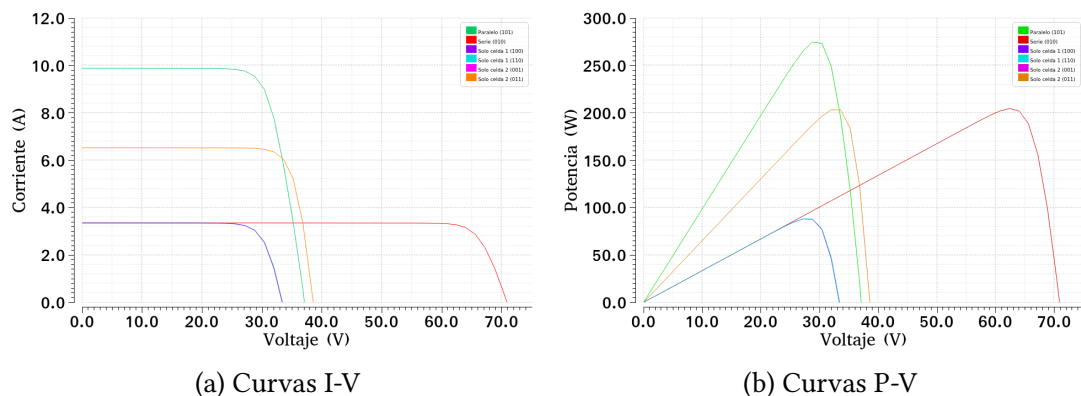


Figura 4.9: Curvas características para serie (rojo), paralelo (verde), solo celda 1 (morado y azul cielo) y solo celda 2 (naranja y rosa) cuando la irradiancia tiene valores de 800 y 400 W/m^2 y la temperatura tiene valores de 15 y 45 °C.

En el tercer escenario, se cambian los cuatro parámetros de irradiancia y temperatura. Los valores considerados son los utilizados en los dos escenarios anteriores: $L1 = 800 W/m^2$, $L2 = 400 W/m^2$, $T1 = 15 °C$ y $T2 = 45 °C$. En comparación a cuando se tienen los parámetros a condiciones STC, al variar irradiancia y temperatura se observa una disminución en I_{sc} y V_{oc} , esto se ve reflejado en la P_{max} en los cuatro casos.

4.3 Módulo anidado

Ahora que se verificó el correcto funcionamiento del módulo unitario, se continuó con esta sección en donde se diseñó una arreglo denominado "módulo anidado". Este contiene en su interior dos módulos unitarios conectados entre sí mediante tres switches, de manera similar al diseño del módulo unitario. Se tienen entonces cuatro módulos fotovoltaicos dentro del símbolo del módulo anidado, como lo muestra la Fig. 4.10.

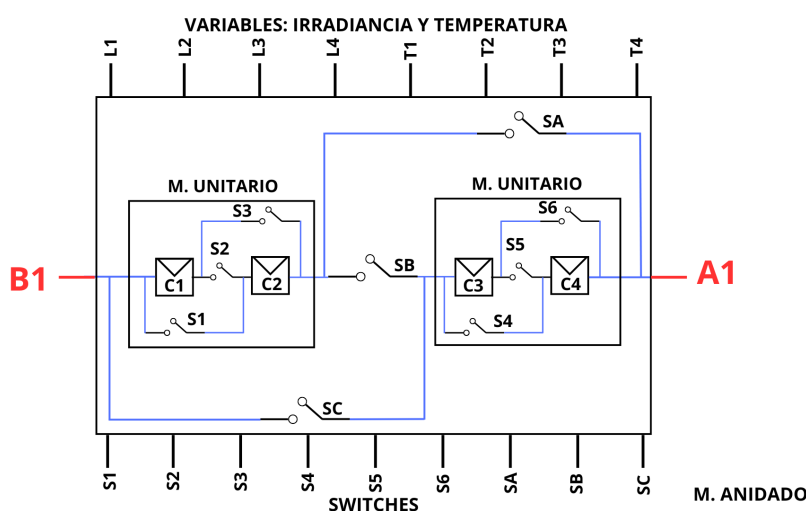
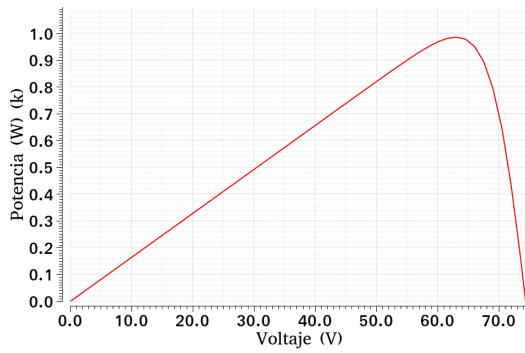


Figura 4.10: Módulo anidado

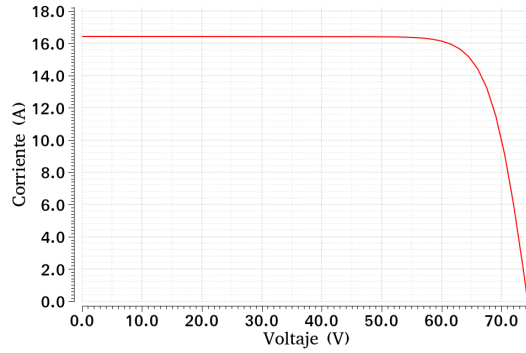
El símbolo del módulo anidado contiene dos puertos de entrada/salida (B1, A1), cuatro puertos para cambiar las variables de temperatura de cada módulo (T1, T2 para el primer módulo unitario y T3, T4 para el segundo), cuatro puertos para la irradiancia de cada módulo (L1, L2 para el primer módulo unitario y L3, L4 para el segundo), el puerto a tierra (GND) y nueve puertos para poder cambiar los valores de los interruptores a 0 (abierto) y 1 (cerrado): S1, S2 y S3 para el primer módulo unitario, S4, S5 y S6 para el segundo, y SA, SB y SC para las conexiones entre ambos módulos. En la Fig. 4.12 se muestra la configuración final para el módulo anidado con sus respectivos componentes y puertos.

Módulo anidado	
Potencia máxima P_{max}	981.54 W/m ²
Voltaje de circuito abierto V_{oc}	74.3 V
Corriente de cortocircuito I_{sc}	16.43 A
Voltaje en MPPT V_{mp}	61.5 V
Corriente en MPPT I_{mp}	15.96 A

Table 4.3: Especificaciones del módulo anidado a STC

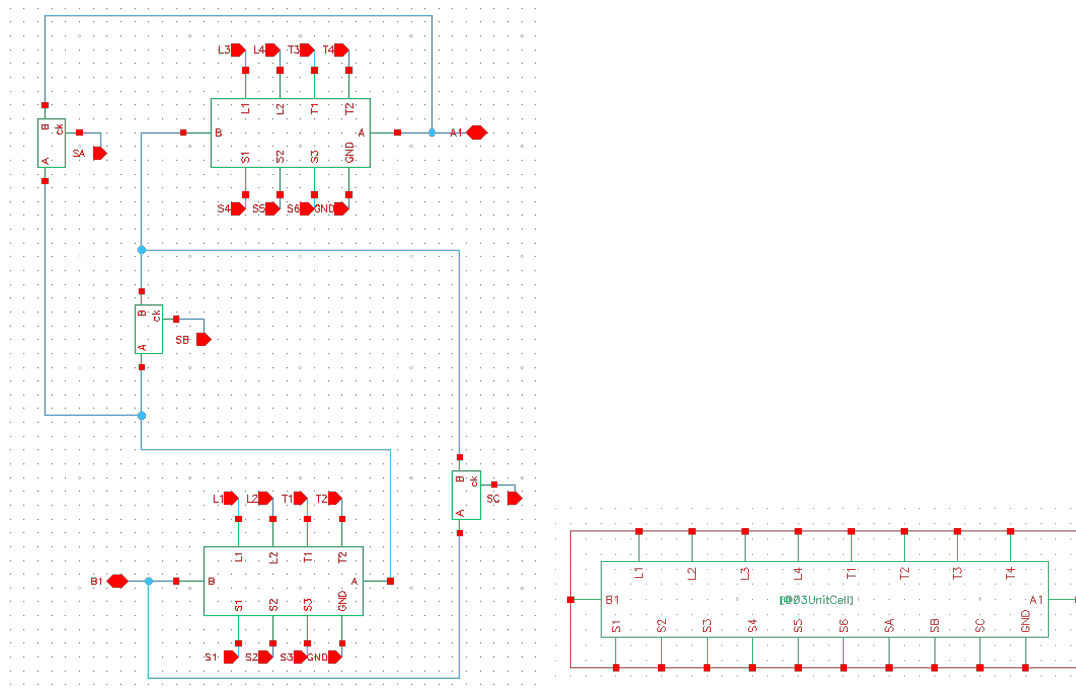


(a) Curva I-V



(b) Curva I-P

Figura 4.11: Curvas características del módulo anidado.



(a) Componentes

(b) Símbolo

Figura 4.12: Componentes internos y símbolo del módulo anidado

Al ser 9 switches cuyo valor puede variar entre 2 estados, 0 y 1, las combinaciones posibles son 512, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$2^9 = 512 \tag{4.1}$$

Ahora, como se muestra en la Tabla 4.1, se tienen 8 casos posibles. Sin embargo, los casos de conexión que presentan cortocircuito (111) o circuito abierto (000) no son válidos en la

simulación en Virtuoso, por lo que no se toman en cuenta. Por lo tanto, solo se consideran los 6 casos restantes, los cuales son: en serie (010), paralelo (101), solo celda 1 (110 y 100) y solo celda 2 (011 y 001). La celda anidada cuenta entonces con 3 elementos que contienen switches (módulo 1, módulo 2 y la conexión entre ambos), y cada elemento pueden cambiar entre 6 combinaciones distintas, por lo que las conexiones posibles con estos componentes son 216, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$6^3 = 216 \quad (4.2)$$

A lo largo de esta sección se presentarán distintos escenarios y parámetros de entrada con el fin de observar el comportamiento de las curvas características en condiciones variables, así como validar su funcionamiento. Los casos de estudio a presentar son los siguientes:

1. En serie: los dos módulos unitarios están conectados en serie (010), y la conexión entre ellos también es en serie (010). Los parámetros de irradiancia y temperatura están a condiciones estándar de medida.
2. En paralelo: los dos módulos unitarios están conectadas en paralelo (101), y la conexión entre ellos también es en paralelo (101). Los parámetros de irradiancia y temperatura están a condiciones estándar de medida.
3. Combinación 1: uno de los módulos unitarios está conectado en paralelo (101), el otro en serie (010), y la conexión entre ellos en serie (010). Los parámetros de irradiancia y temperatura están a condiciones estándar de medida.
4. Combinación 2: uno de los módulos unitarios está conectado en paralelo (101), el otro en serie (010), y la conexión entre ellos es en paralelo (101). Los parámetros de irradiancia y temperatura están a condiciones estándar de medida.
5. En condiciones variables: se presenta la combinación 2 de nuevo, pero uno de los cuatro módulos dentro de la celda anidada presenta sombreado por lo que la irradiancia disminuye, afectando así al resto del sistema. Los parámetros de irradiancia y temperatura están a condiciones estándar de medida para tres celdas. Los parámetros para el módulo 1 que está sombreado son: irradiancia $L = 200 \text{ W/m}^2$ y la temperatura $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$.

4.3.1 Configuración serie

Para el primer caso se presenta una configuración en serie (010) con variables de entrada a condiciones estándar de medida, esto quiere decir que ambos módulos están conectados en serie y también entre sí, por lo que la configuración en los switches y variables de entrada queda de la siguiente manera:

1. Para el módulo 1:
 - a) $S1 = 0$

b) $S_2 = 1$

c) $S_3 = 0$

2. Para el módulo 2:

a) $S_4 = 0$

b) $S_5 = 1$

c) $S_6 = 0$

3. Para las conexiones entre ambos:

a) $S_A = 0$

b) $S_B = 1$

c) $S_C = 0$

4. Variables de entrada:

a) $L_1, L_2, L_3, L_4 = 1000 \text{ W/m}^2$

b) $T_1, T_2, T_3, T_4 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$

Esta configuración se presenta en la Fig. 4.13. La simulación de las curvas características correspondientes a este modelo reflejan un aumento considerable en el voltaje, esto es esperado ya que para las conexiones en serie el voltaje de cada celda se suma, por tanto al ser cuatro celdas y todas conectadas en serie, el voltaje de todo el sistema es cercano a 150 V. Esto también afecta la curva de potencia, como se observa en la Fig. 4.14

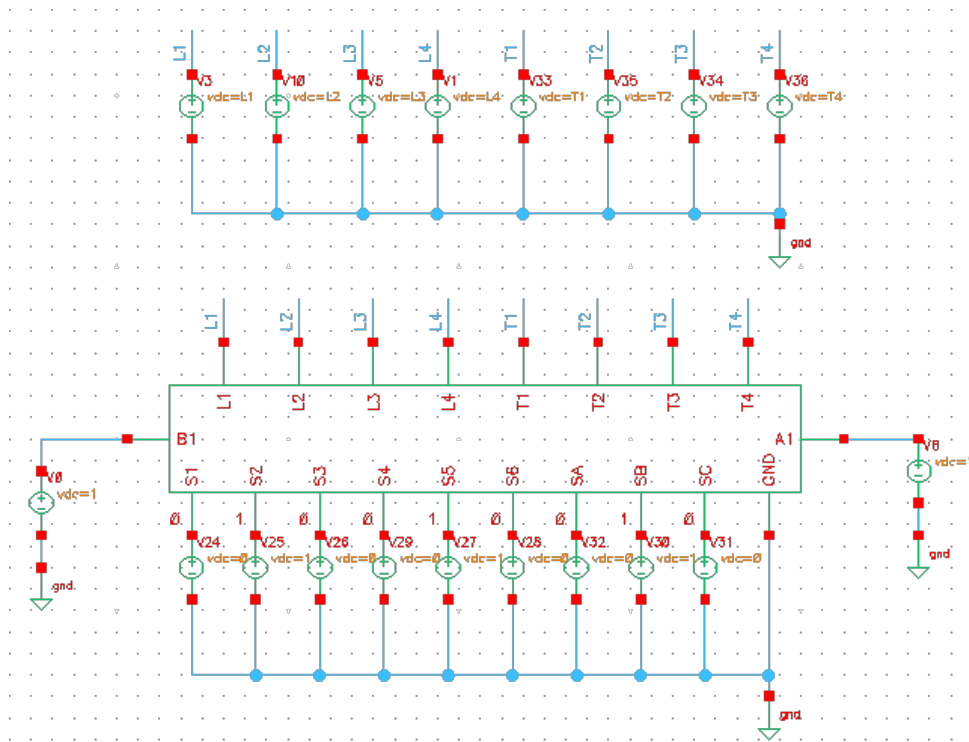


Figura 4.13: Conexión del circuito en Virtuoso de dos módulos conectados en serie (010), y la conexión entre ellos también es en serie (010)

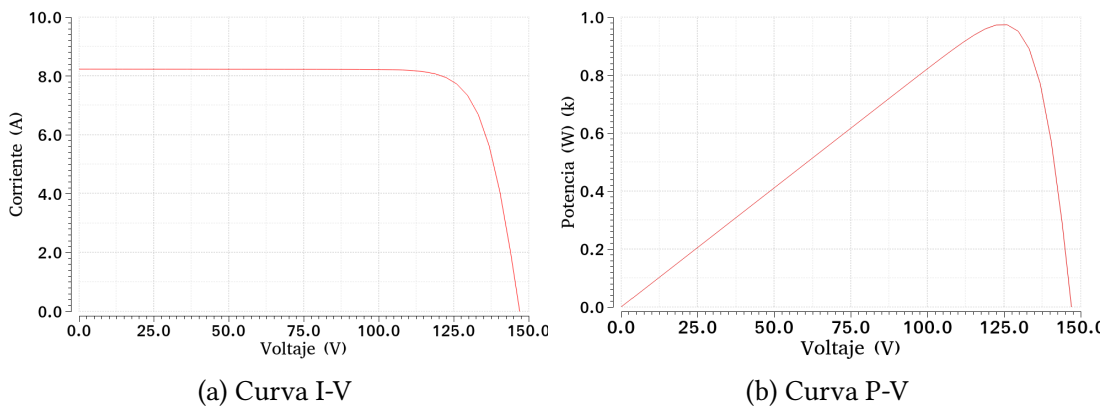


Figura 4.14: Curvas características para el caso en serie

4.3.2 Configuración en paralelo

Para el segundo caso se tiene una configuración en paralelo (101), nuevamente con variables de entrada a condiciones estándar de medida, por lo que ambos módulos unitarios tiene conexión en paralelo, y también entre sí. La configuración en los switches y las variables de entrada se presentan a continuación:

1. Para el módulo 1:
 - a) $S1 = 1$
 - b) $S2 = 0$
 - c) $S3 = 1$
2. Para el módulo 2:
 - a) $S4 = 1$
 - b) $S5 = 0$
 - c) $S6 = 1$
3. Para las conexiones entre ambos:
 - a) $SA = 1$
 - b) $SB = 0$
 - c) $SC = 1$
4. Variables de entrada:
 - a) $L1, L2, L3, L4 = 1000 \text{ W}/m^2$
 - b) $T1, T2, T3, T4 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$

Esta configuración se presenta en la Fig. 4.15. La simulación de las curvas características correspondientes a este modelo reflejan ahora un aumento en la corriente de cortocircuito. Se tiene un efecto similar al caso en serie, pero en este escenario al estar conectados en paralelo cuatro módulos, la corriente se suma y la corriente resultante es de 33 A. Esto se refleja en la curva de potencia, la cual se puede observar en la Fig. 4.16.

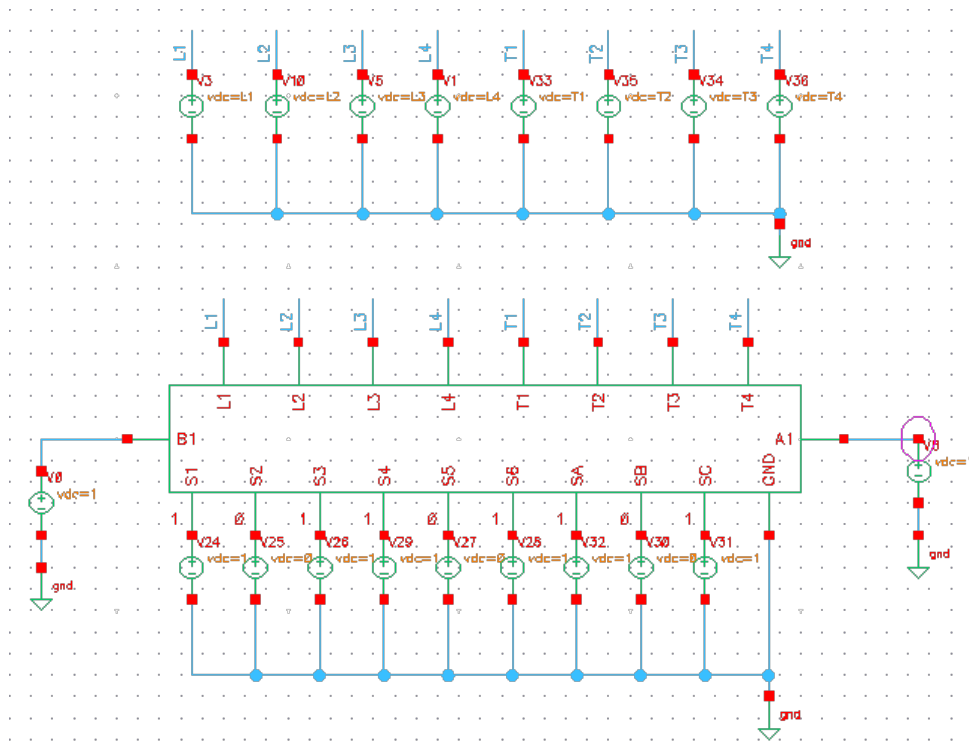


Figura 4.15: Conexión del circuito en Virtuoso de dos módulos conectados en paralelo (101), y la conexión entre ellos también es en paralelo (101)

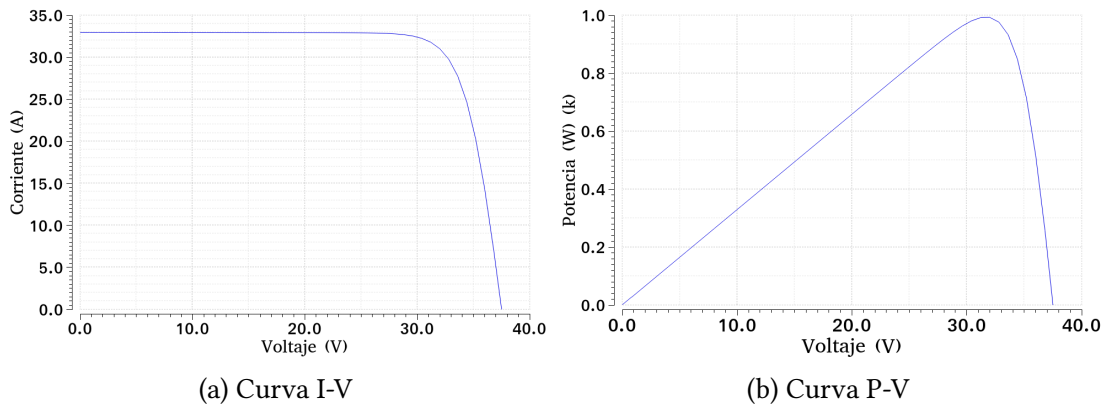


Figura 4.16: Curvas características para el caso en paralelo

4.3.3 Combinación 1

Para el tercer caso, la combinación 1, se tiene una configuración en serie para el módulo 1, para el módulo 2 se tiene una conexión en serie, y la conexión entre ambos módulos es en serie. Las variables de entrada a condiciones estándar de medida se mantienen. La configuración en los switches y las variables de entrada se presentan a continuación:

1. Para el módulo 1:
 - a) S1 = 0
 - b) S2 = 1
 - c) S3 = 0
2. Para el módulo 2:
 - a) S4 = 1
 - b) S5 = 0
 - c) S6 = 1
3. Para las conexiones entre ambos:
 - a) SA = 0
 - b) SB = 1
 - c) SC = 0
4. Variables de entrada:
 - a) L1, L2, L3, L4 = 1000 W/m^2
 - b) T1, T2, T3, T4 = $25 \text{ }^\circ\text{C}$

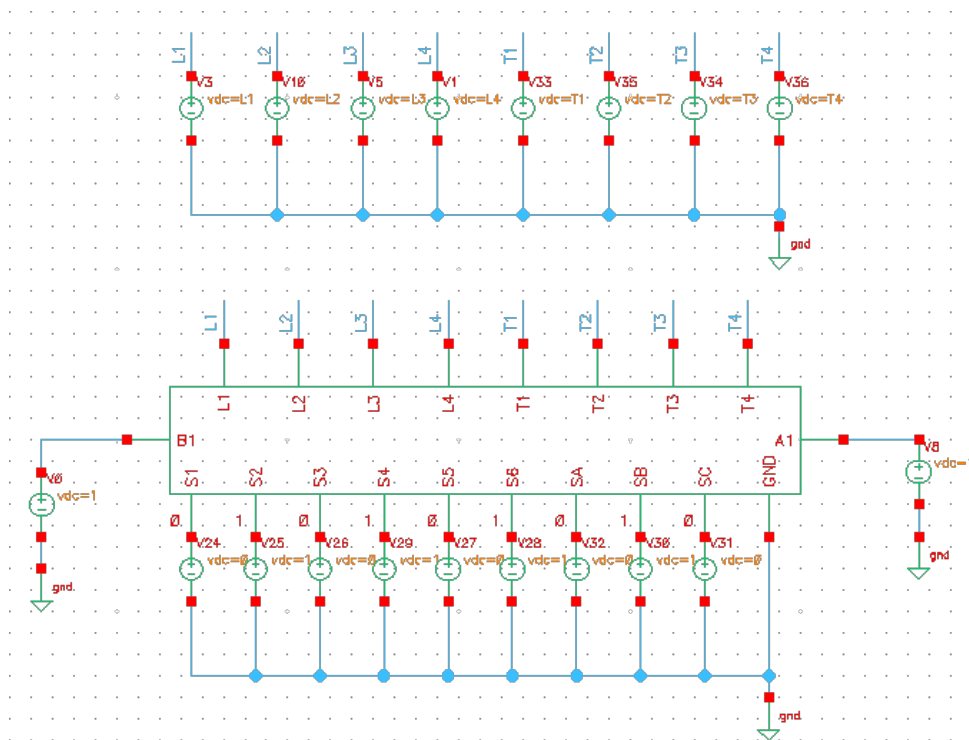


Figura 4.17: Conexión del circuito en Virtuoso correspondiente a la combinación 1.

La configuración de este modelo se presenta en la Fig. 4.18. La simulación de las curvas características correspondientes a la combinación 1 presentan una corriente de cortocircuito de 8.3 A., y un voltaje en circuito abierto de 110 V. aproximadamente.

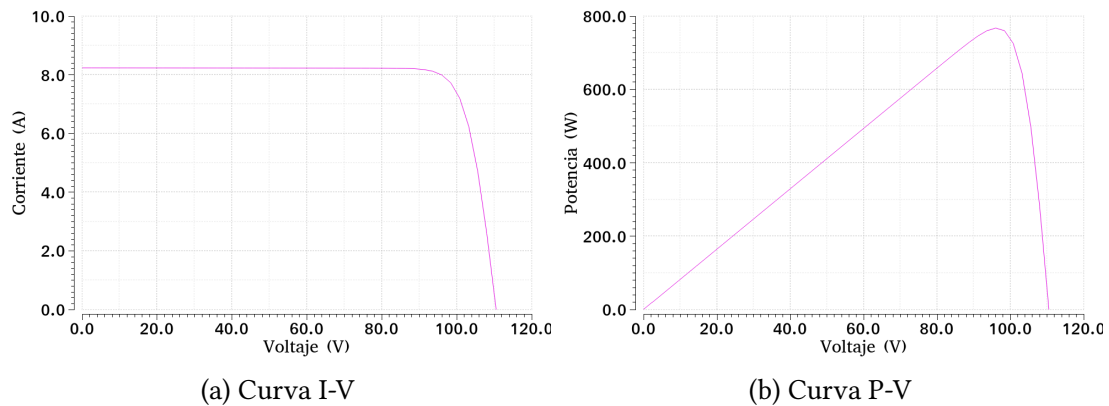


Figura 4.18: Curvas características para el caso con la combinación 1.

4.3.4 Combinación 2

Para la combinación 2, se tiene una configuración en paralelo para uno de los módulo unitarios, el otro está conectado en serie, y la conexión entre ambos módulos es en paralelo. Las variables de entrada a condiciones estándar de medida se mantienen. La configuración en los switches y las variables de entrada se presentan a continuación:

1. Para el módulo 1:
 - a) S1 = 0
 - b) S2 = 1
 - c) S3 = 0
2. Para el módulo 2:
 - a) S4 = 1
 - b) S5 = 0
 - c) S6 = 1
3. Para las conexiones entre ambos:
 - a) SA = 1
 - b) SB = 0
 - c) SC = 1
4. Variables de entrada:
 - a) L1, L2, L3, L4 = $1000 \text{ W}/m^2$

b) T1, T2, T3, T4 = 25 °C

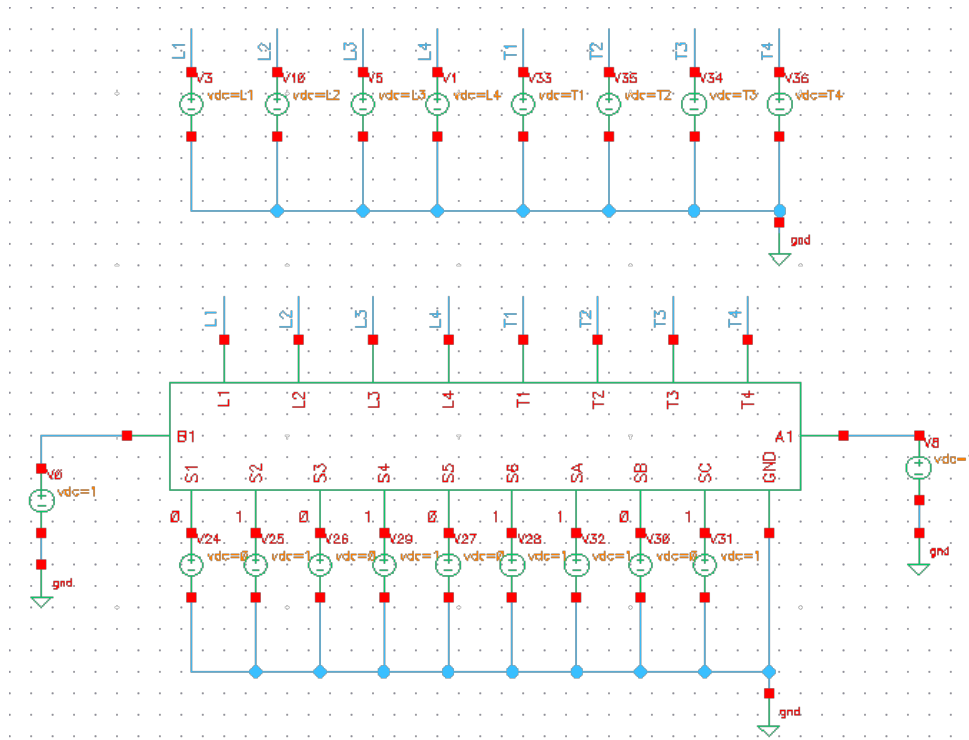


Figura 4.19: Conexión del circuito en Virtuoso correspondiente a la combinación 2.

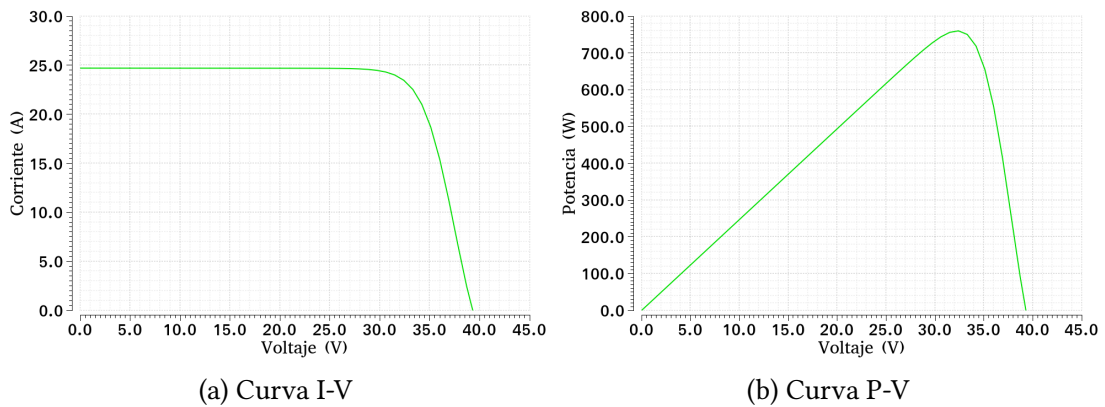


Figura 4.20: Curvas características para el caso con la combinación 2.

4.3.5 En condiciones variables

Para esta combinación se usó la configuración del módulo mostrado en la Fig. 4.21, con ambos módulos conectados en serie y para la conexión entre ambos en paralelo. En este escenario

se toma en cuenta que el módulo 1 presenta sombreado, por lo que tiene menor irradiancia y temperatura. Las variables de entrada presentan cambios solo en el módulo 1, por lo que se espera ver efectos en la corriente ya que se tiene una conexión en serie. Se cambiaron las variables de entrada por los valores siguientes:

1. Para el módulo 1:
 - a) $S1 = 0$
 - b) $S2 = 1$
 - c) $S3 = 0$
2. Para el módulo 2:
 - a) $S4 = 0$
 - b) $S5 = 1$
 - c) $S6 = 0$
3. Para las conexiones entre ambos:
 - a) $SA = 1$
 - b) $SB = 0$
 - c) $SC = 1$
4. En irradiancia L:
 - a) $L1 = 200 \text{ W}/m^2$
 - b) $L2, L3, L4 = 1000 \text{ W}/m^2$
5. En temperatura T:
 - a) $T1 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$
 - b) $T2, T3, T4 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$

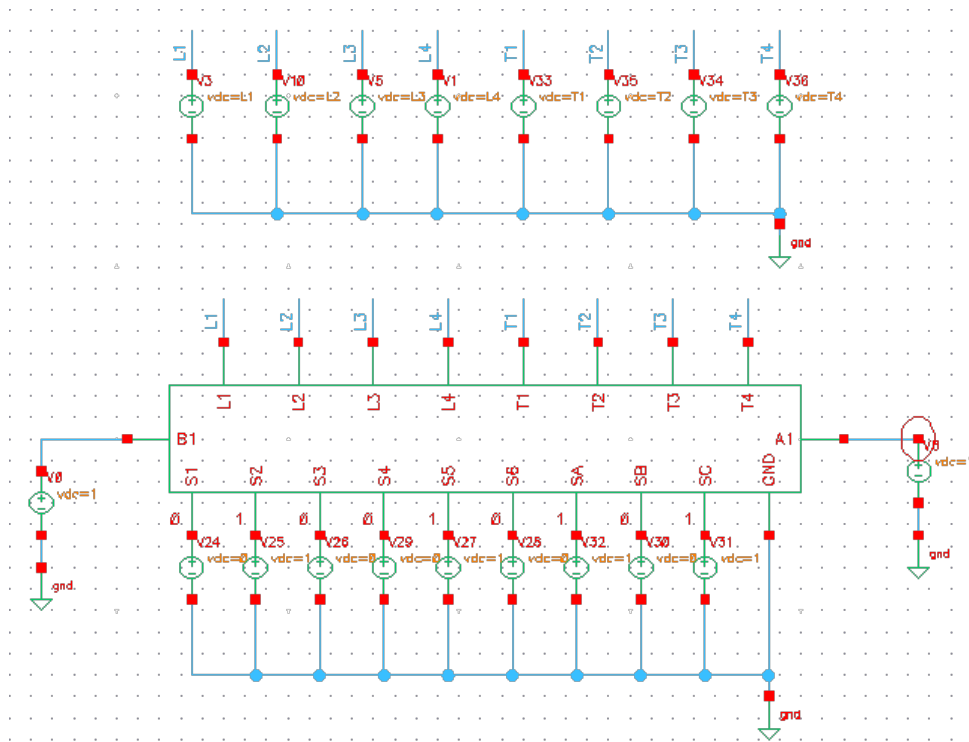


Figura 4.21: Conexión del circuito en Virtuoso correspondiente a la combinación 2.

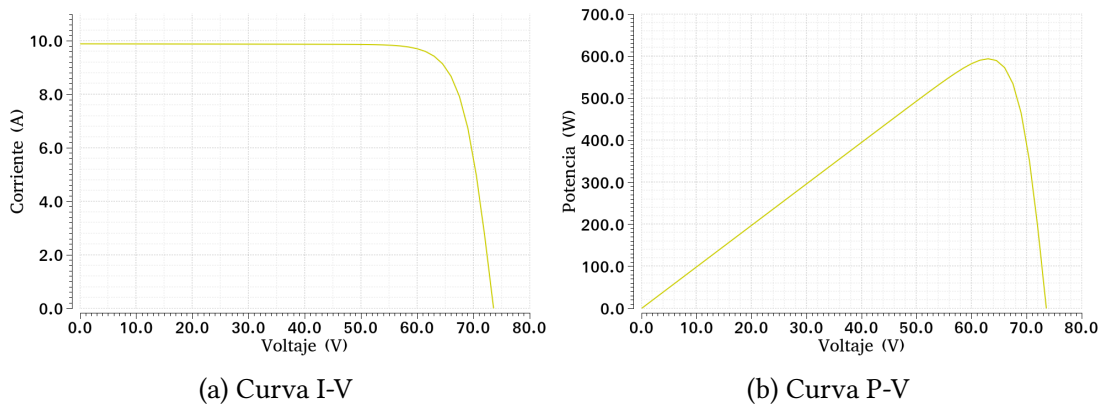


Figura 4.22: Curvas características para el escenario en condiciones variables

Se observa una disminución considerable en la corriente de cortocircuito a pesar de que solo el módulo 1 sufre sombreado parcial, y los módulos 2, 3 y 4 continúan con una irradiancia y temperatura constante. Se concluye entonces que sería mejor una re-configuración en la conexión en donde se excluya a la celda 1 y de esta manera se aumenta el MPP general del sistema.

4.4 Análisis de rendimiento con sombreado

A continuación se retoma el escenario 4.3.5 en donde la celda 1 presenta un sombreado con una irradiancia (L1) de 200 W/m^2 y una temperatura (T1) de 20°C . Los tres módulos restantes presentan condiciones estándar de medida (STC: 1000 W/m^2 y 25°C). Se considera un módulo anidado de configuración 2×2 , compuesto por dos celdas en serie por rama, y dos ramas conectadas en paralelo.

Se analizan tres escenarios distintos:

1. Escenario 1: Arreglo reconfigurado sin celda 1 En el primer caso, se usa una configuración 110 para los tres bloques de switches, es decir, se excluye del sistema a la celda 1 que presenta sombreado. En este caso, el sistema se ve afectado por la pérdida energética del módulo, y presenta la menor Potencia de los tres casos.
2. Escenario 2: Arreglo fijo En el segundo caso, no se reconfigura el sistema, por lo que mantiene su conexión serie-paralelo. Sin embargo, sí sufre una pérdida energética considerable, a comparación de la Tabla 4.3, en donde se observan los parámetros del módulo anidado con la misma configuración, con la diferencia de no tener sombreado.
3. Escenario 3: Arreglo reconfigurado en serie En el tercer caso, se realiza una reconfiguración del sistema en donde se excluye del arreglo al módulo 1, que presenta un rendimiento menor, y los tres módulos restantes son conectados en serie. Esta opción es la más óptima, ya que al conectar en serie el arreglo, aumenta considerablemente el voltaje, y a su vez, la potencia final del sistema.

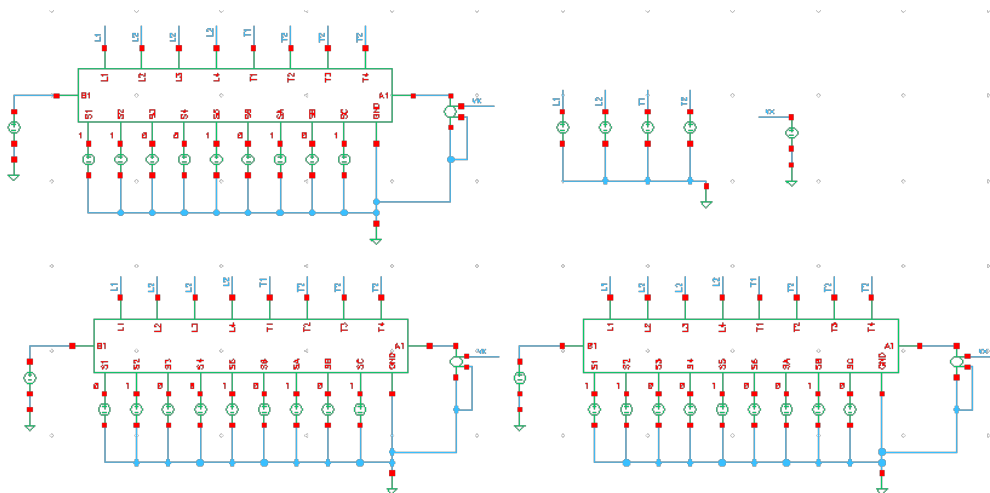


Figura 4.23: Conexión del circuito en Virtuoso mostrando tres escenarios distintos de reconfiguración.

Se obtuvieron las curvas características para los tres casos, así como los parámetros de funcionamiento de las mismas. Estas curvas se presentan en la Fig. 4.24. También puede observarse una comparación de los parámetros de las curvas en la Tabla 4.4

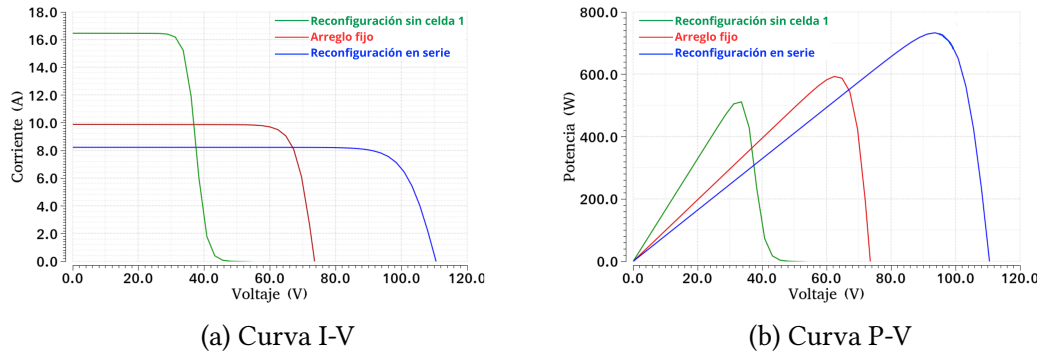


Figura 4.24: Curvas características para las tres reconfiguraciones distintas.

En la siguiente tabla se comparan los tres escenarios:

Módulo unitario			
Parámetros	Reconfigurado sin celda 1	Arreglo fijo	Reconfigurado en serie
Potencia máxima P_{max} [W/m^2]	511.72	590.4	730.05
Voltaje de circuito abierto V_{oc} [V]	43.2	73.51	110.4
Corriente de cortocircuito I_{sc} [A]	16.46	9.89	8.23
Voltaje en MPP V_{mp} [V]	33.6	63.69	94.69
Corriente en MPP I_{mp} [A]	15.23	9.27	7.71

Table 4.4: Comparación de las tres diferentes reconfiguraciones.

Al analizar los tres escenarios simulados, se observa una diferencia significativa en la potencia generada por el sistema dependiendo de la configuración adoptada. El escenario 1, donde se excluye la celda 1 sombreada utilizando la configuración 110, obtuvo una potencia de $511.72 W/m^2$, siendo el caso con menor rendimiento energético.

En el escenario 2, correspondiente al arreglo fijo (sin reconfiguración), se obtuvo una potencia de $590.4 W/m^2$. Esto representa un incremento del 15.36% en la potencia respecto al escenario 1, evidenciando que incluso sin exclusión de la celda sombreada, el sistema puede desempeñarse mejor que en una configuración inadecuada de desconexión.

Por otro lado, el escenario 3, en el que se realiza una reconfiguración en serie excluyendo la celda de bajo rendimiento, alcanza la mayor potencia registrada con $730.05 W/m^2$. Esta configuración mejora en un 42.65% respecto al escenario 1 y en un 23.63% respecto al escenario

2.

Estos resultados demuestran que la estrategia de reconfiguración dinámica del sistema no solo permite mantener la operación ante condiciones adversas como el sombreado parcial, sino que puede optimizar significativamente la generación de energía, sobre todo cuando se adoptan tecnologías que maximizan el aprovechamiento de la tensión del sistema como lo es la conexión en serie. En las curvas características P-V podemos ver que es evidente la mejora en la respuesta de potencia de los arreglos reconfigurables, el cual es en este caso en serie. Estos resultados justifican la necesidad de técnicas de reconfiguración dinámica para maximizar la generación energética en condiciones variables.

4.5 Simulación transitoria

En esta sección se expone la respuesta del circuito en función del tiempo. Nuevamente se usa la herramienta Virtuoso para la simulación y se comienza con la celda unitaria, la cual incluye dos módulos conectados entre sí mediante switches. El circuito se presenta en la Fig. 4.25.

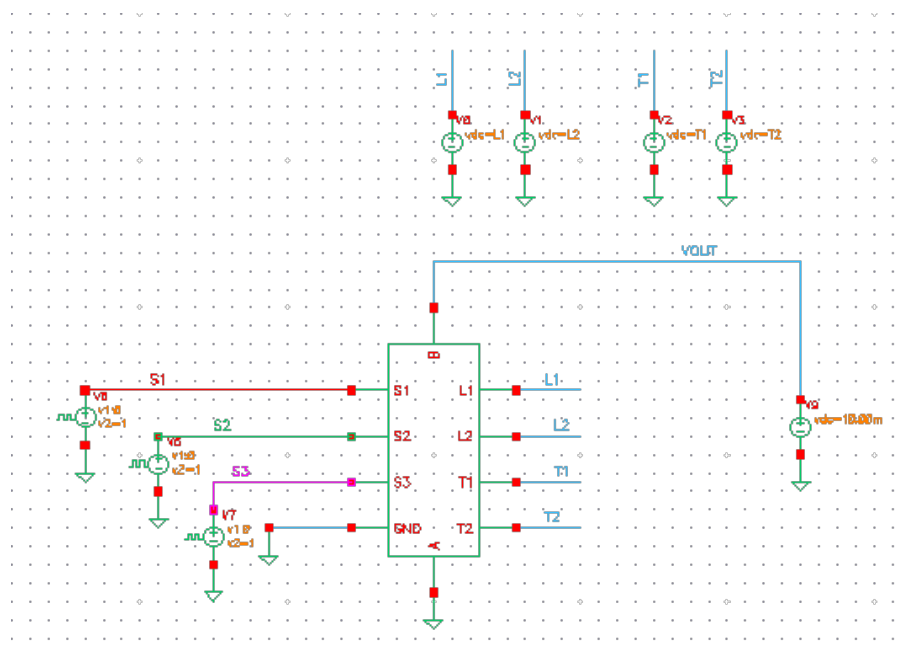


Figura 4.25: Conexión del circuito en Virtuoso con el módulo unitario para la simulación transitoria

Para las entradas de cada switch (S1, S2 Y S3) se usa un generador VPULSE, el cual se utiliza para medir la respuesta transitoria del circuito, este componente nos permite controlar los factores determinantes que afectan a la onda cuadrada. Los parámetros utilizados se enumeran a continuación:

1. Voltaje 1 = 1 V
2. Voltaje 2 = 2 V
3. Periodo = 1 s
4. Ancho de pulso = 0.5 s
5. $L1, L2 = 1000 \text{ W}/m^2$
6. $T1, T2 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$

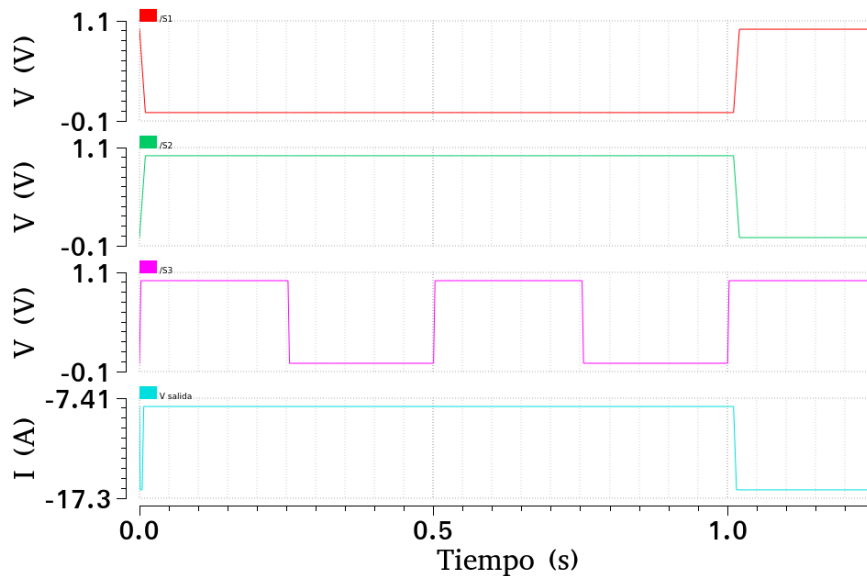


Figura 4.26: Respuesta transitoria de los switches S1, S2 Y S3 en el módulo unitario.

En la simulación obtenida se observan las respuestas transitorias de los tres interruptores (S1, S2 y S3) y de la corriente (I) en cada caso. Para este fin se varía el ancho de pulso para cada switch, de esta forma se obtienen tres casos distintos: Solo módulo 2 (011), Serie (010) y Paralelo (101). La corriente oscila entre 7.41 y 17.3 A. La dirección negativa de la respuesta transitoria en la corriente sugiere que los módulos están entregando energía.

Recordando los resultados de la tabla 4.2, para los primeros dos casos: Solo celda 2 (011) y Serie (010) la corriente permanece igual, sin embargo, para el tercer caso en Paralelo (101) se observa un incremento considerable en la corriente, lo cual corrobora el funcionamiento de la celda.

4.6 Comparación con trabajos similares

Los métodos de reconfiguración dinámica descritos en la literatura varían tanto en la forma del sistema como en los algoritmos que los controlan. Analizarlos permite entender las distintas

estrategias existentes y cómo estas optimizan el desempeño de los arreglos fotovoltaicos bajo condiciones de sombreado e irradiancia. Se encuentran trabajos sobre sistemas de reconfiguración de arreglos fotovoltaicos, como el presentado en la tesis [27], el cual utiliza el bloque "Solar Cell" incluido en MATLAB/Simulink para simular distintos arreglos fotovoltaico implementando dos algoritmos de reconfiguración dinámica: ERA (evaluación exhaustiva) y SRA (reconfiguración ordenada). El algoritmo ERA se enfoca en reducir el tiempo de cálculo, disminuyendo el ancho del espacio de búsqueda; mientras que el del algoritmo SRA busca que la reconfiguración del sistema sea ordenada en función del nivel de irradiancia que se recibe en cada módulo.

Dicha tesis trabaja con un sistema de 12 módulos fotovoltaicos, en donde cada módulo contiene 6 switches para su reconfiguración, por lo que el sistema usa 72 switches en total, como se observa en la Fig. 4.27.

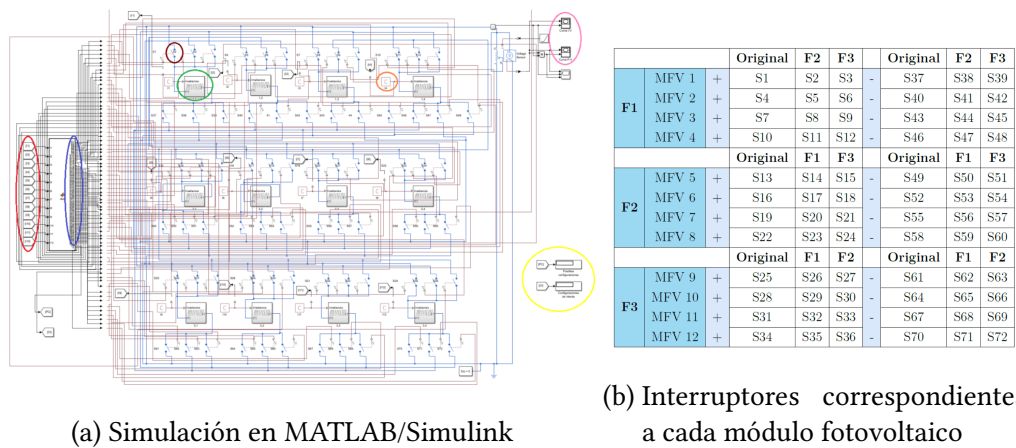


Figura 4.27: Modelo de reconfiguración de la tesis [27].

Este sistema presenta un incremento en la corriente de corto circuito considerable, dando como resultado una mejora de máximo 116.84% para el algoritmo SRA y para el algoritmo ERA un porcentaje de mejora máxima de 78.94 %.

De manera análoga, el presente trabajo propone un sistema fotovoltaico implementando switches, no obstante, se busca optimizar el tiempo de respuesta y disminuir el número de elementos necesarios en el circuito. Es por ello que para simular el sistema propuesto de 12 módulos, se tienen dos opciones:

- Con 6 módulos unitarios, cada uno con 3 switches, por lo que se necesitarían 18 switches,
- Con 3 módulos anidados, cada uno con 9 switches, por lo que se necesitarían 27 switches.

Se propone realizar una serie de permutaciones que permitan reconfigurar el sistema de modo que al final sea controlado por una palabra digital (0, 1).

	Módulos	Interruptores	Tipo de control	Código
Tesis con Matlab [27]	12	72	Algoritmos de reconfiguración dinámica	Script en Simulink
Esta tesis	4	9	Palabra de 8 bit digital	Verilog A (HDL) en Cadence

Table 4.5: Tabla comparativa entre ambos trabajos.

En resumen, el trabajo previo ofrece algoritmos avanzados con una implementación detallada en Simulink, y controlando un sistema complejo de 72 switches distribuidos en 12 módulos. Esta propuesta destaca por su precisión y flexibilidad en escenarios de sombreado, aunque a costa de una mayor complejidad en el hardware. Por otro lado, el presente estudio se orienta hacia una solución más práctica y eficiente desde el punto de vista del diseño de hardware, buscando una reconfiguración eficaz con menos recursos y mayor rapidez.

CAPÍTULO 5

Conclusión

Este trabajo de tesis se enfocó en la validación de configuraciones de arreglos fotovoltaicos serie-paralelo mediante simulaciones en el programa de diseño Virtuoso de Cadence. Se propuso un método basado en interruptores que permiten modificar la configuración del sistema de forma dinámica, alternando la conexión en serie, paralelo, solo celda 1 o solo celda 2. Este enfoque surge de la necesidad de minimizar las pérdidas por desajuste en sistemas fotovoltaicos y mejorar la eficiencia del sistema frente a variaciones en condiciones variables.

Para validar el modelo propuesto se diseñaron y analizaron dos estructuras principales: el módulo unitario y el módulo anidado, los cuales fueron sometidos a pruebas bajo distintos niveles de irradiancia y temperatura. Se consideraron tanto escenarios de medición estándar como condiciones variables, observando que ambas configuraciones respondieron de manera adecuada a los cambios en el entorno. Asimismo, se presentó la respuesta transitoria de la celda unitaria en función del tiempo, mostrando tres casos distintos y la corriente generada en cada uno. Como resultado, se comprobó que el sistema propuesto permite una mejora significativa en el rendimiento energético del arreglo. En particular, el análisis de tres escenarios distintos mostró que el arreglo con reconfiguración en serie, excluyendo la celda afectada (escenario 3), alcanzó la mayor potencia con 730.05 W/m^2 , lo que representa una mejora del 42.65% respecto al escenario con exclusión parcial (escenario 1) y del 23.63% en comparación con el arreglo fijo sin reconfiguración (escenario 2). Estos resultados validan la efectividad del sistema propuesto, demostrando que una arquitectura adaptable permite mitigar las pérdidas por desajuste y optimizar la producción energética del arreglo fotovoltaico en condiciones no ideales.

El desarrollo del modelo presentó diversos desafíos, dado que fue construido desde el código base y posteriormente implementado en Virtuoso. Uno de los principales retos fue la convergencia presentada en las gráficas de las simulaciones durante la validación de distintas fases del modelo. Sin embargo este proceso permitió identificar las fallas existentes y dando paso a una mejora en el modelo, lo que llevó a un mayor acercamiento al comportamiento real de una celda fotovoltaica. Finalmente, el modelo de celda fue utilizado en todas las simulaciones presentadas en este trabajo, mostrando una respuesta acorde a la variabilidad de las condiciones ambientales.

El estudio de la reconfiguración de arreglos fotovoltaicos es un área en constante desarrollo, impulsada por la imprevisibilidad de las condiciones externas y la innovación en materiales semiconductores. A partir de los resultados obtenidos en esta tesis, se ha demostrado que es posible realizar una caracterización precisa de celdas solares a través de simulaciones en Virtuoso de Cadence, logrando una representación realista del comportamiento de los dispositivos.

Estos hallazgos reflejan el potencial de la simulación como herramienta de validación para configuraciones dinámicas. En conjunto, este trabajo representa un aporte significativo al diseño y optimización de sistemas fotovoltaicos más eficientes y adaptativos frente a condiciones ambientales adversas.

CAPÍTULO 6

Trabajo a futuro

Durante este proyecto, se logró desarrollar una infraestructura de simulación y validación en el entorno de diseño Virtuoso de Cadence, la cual queda ahora disponible para futuras investigaciones en el área. Este sistema representa una herramienta valiosa para experimentar con configuraciones y estrategias de reconfiguración dinámica en arreglos fotovoltaicos. Como línea de trabajo a futuro, se considera altamente viable aprovechar esta infraestructura como base para la implementación de algoritmos de inteligencia artificial orientados a la optimización de la generación energética en condiciones variables. Asimismo, este trabajo representa un esfuerzo por vincular los conocimientos adquiridos en energías renovables con el diseño electrónico, permitiendo así abordar problemas reales del ámbito fotovoltaico desde una perspectiva interdisciplinaria y digital.

Como trabajo a futuro relacionado a este se propone:

- Mejorar de las conexiones a nivel layout del circuito del módulo fotovoltaico para reducir efectos parásitos.
- Ampliar el banco de pruebas con distintas condiciones variables y así lograr un modelo más preciso.
- Implementar el uso de máquinas de estados, y así tomar decisiones automatizadas sobre la mejor configuración ante condiciones variables, incrementando el rendimiento global de los arreglos fotovoltaicos.

Referencias

- [1] R. P. Narváez, “Factor de emisión de co 2 debido a la generación de electricidad en el ecuador durante el periodo 2001-2014,” *ACI Avances en Ciencias e Ingenierías*, vol. 7, no. 2, 2015. → [p1]
- [2] Gobierno de México, “Reporte de avances de energías limpias,” *Secretaría de Energía*, pp. 1–15, 2024. → [p2]
- [3] I. P. on Climate Change (IPCC), “Climate change 2023: Synthesis report. summary for policymakers,” tech. rep., IPCC, 2023. → [p2]
- [4] G. Spagnuolo, G. Petrone, B. Lehman, C. A. R. Paja, Y. Zhao, and M. L. O. Gutierrez, “Control of photovoltaic arrays: Dynamical reconfiguration for fighting mismatched conditions and meeting load requests,” *IEEE industrial electronics magazine*, vol. 9, no. 1, pp. 62–76, 2015. → [p3]
- [5] A. P. G. Delgadillo, “Fabricación y caracterización de un prototipo de sistema fotovoltaico,” *Tesis de licenciatura. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla*, 2021. → [p3], [p10]
- [6] O. de las Naciones Unidas, “Objetivos de desarrollo sostenible,” *Naciones Unidas*, 2024. → [p4], [p69]
- [7] R. García Barrios, “¿qué son los pronaces?,” *Boletín CONAHCYT*, vol. (1), 8-11, 2019. → [p5], [p69]
- [8] C. y. T. Consejo Nacional de Humanidades, “Programas nacionales estratégicos (pronaces),” *CONAHCYT*, 2024. → [p5]
- [9] I. E. Agency, “What is the role of renewables in electricity generation in mexico?,” *IEA Countries and Regions*, 2024. → [p6], [p7], [p69]
- [10] S. de Energía, “Programa de desarrollo del sistema eléctrico nacional,” *PRODESEN*, 2023. → [p8], [p69]
- [11] S. Honsberg, C. Bowden, “Solar energy,” *PVEducation. Photovoltaics Education Website*, 2019. → [p9], [p10], [p11], [p12], [p14], [p16], [p20], [p22], [p69]
- [12] T. L. Floyd, *Dispositivos electrónicos*. Pearson Education, 2008. → [p10], [p11], [p12], [p69]

-
- [13] R. G. P. Bruno Enríquez Pérez, Karolina Fernández, *Fotovoltaica. Manual de diseño e instalación: Una panorámica de la energía fotovoltaica*. Solar Energy International: Educación en energía renovable para un futuro sostenible, 2015. → [p14]
- [14] P. Puig and M. Jofra., “Energía solar fotovoltaica,” *Energías Renovables, Iberdrola*, vol. 26, p. 20, 2007. → [p15]
- [15] F. Adler, M. Berardi, M. García Pedrosa, F. Monticelli, and M. Morquecho, “Energía solar fotovoltaica,” *Instalaciones industriales*, vol. 19, 2013. → [p15]
- [16] J. E. N. Jerez, M. Alfaro, I. Alfaro, and R. Guerra, “Determinación de la eficiencia de un mini panel solar fotovoltaico: Una experiencia de laboratorio en energías renovables,” *Departamento de Química, Instituto de Investigación Multidisciplinario en Ciencia y Tecnología. Universidad de La Serena. Chile.*, 2020. → [p16], [p18], [p69]
- [17] J. A. R. Cruz, R. C. A. Lázaro, V. R. G. Díaz, and J. J. E. López, “Determinacion de los parametros de una celda solar y su analisis comparativo con el modelo de un solo diodo mediante simulacion en Itspice,” *XLV Semana Nacional de Energía Solar*, 2021. → [p17], [p18], [p69]
- [18] S. R. C. et al., “Seguidor integrado de punto de máxima potencia para un circuito de cosecha de energía,” *Tesis de maestría. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla*, 2017. → [p17], [p26], [p32]
- [19] J.-G. K. Young-Hyok Ji, Doo-Yong Jung, “A real maximum power point tracking method for mismatching compensation in pv array under partially shaded conditions.,” *IEEE Transactions on power electronics*, vol. 26, pp. 1001–1009, 2010. → [p19]
- [20] D. La Manna, V. L. Vigni, E. R. Sanseverino, V. Di Dio, and P. Romano, “Reconfigurable electrical interconnection strategies for photovoltaic arrays: A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 33, pp. 412–426, 2014. → [p20], [p69]
- [21] E. E. Granda-Gutiérrez, O. A. Orta, J. Díaz-Guillén, M. A. Jimenez, M. Osorio, and M. A. González, “Modelado y simulación de celdas y paneles solares,” *Congreso Internacional de Ingeniería Electrónica. Corporación Mexicana de Investigación en Materiales S. A. de C. V.*, vol. 35, 2013. → [p19]
- [22] C.-M. Huang, S.-J. Chen, S.-P. Yang, Y.-C. Huang, and P.-Y. Huang, “Parameter estimation and preliminary fault diagnosis for photovoltaic modules using a three-diode model,” *Energies*, vol. 17, p. 3214, 2024. → [p20]
- [23] Y. Mahmoud and E. F. El-Saadany, “Enhanced reconfiguration method for reducing mismatch losses in pv systems,” *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 7, no. 6, pp. 1746–1754, 2017. → [p22], [p23], [p69]

- [24] S. Zenteno-Franco, V. R. Gonzalez-Diaz, R. C. Ambrosio-Lazaro, J. F. Guerrero-Castellanos, and G. Mino-Aguilar, "Spice synthesis of a solar cell model with irradiance and temperature evaluation," *International Journal of Circuit Theory and Applications*, vol. 50, no. 9, pp. 3071–3085, 2022. → [p24], [p25], [p69]
- [25] S. Romero-Camacho, V. Gonzalez-Diaz, R. Ambrosio-Lazaro, G. Mino-Aguilar, E. Bonizoni, and F. Maloberti, "A new linearized behavioral model for solar cells," *IEEE Journal of Photovoltaics*, pp. 1–6, 2017. → [p32]
- [26] X. Fang, Q. Yang, and W. Yan, "Switching matrix enabled optimal topology reconfiguration for maximizing power generation in series–parallel organized photovoltaic systems," *IEEE Systems Journal*, vol. 16, no. 2, pp. 2765–2775, 2021. → [p36]
- [27] L. M. M. Rugerio, "Análisis y simulación de un algoritmo de reconfiguración dinámica para un arreglo fotovoltaico," *Tesis de licenciatura. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla*, 2021. → [p61], [p62], [p70]

List of Figures

1.1	Evaluación del progreso de los 17 Objetivos basada en las metas evaluadas, 2023 o datos más recientes (porcentaje) [6]	4
1.2	10 PRONACES CONAHCYT [7]	5
1.3	Evolución de la generación de electricidad por fuentes fotovoltaicas en México desde 2000 [9]	7
1.4	Generación fotovoltaica total en México 2018-2022 (GWh) y su porcentaje respecto a la generación total [10]	8
1.5	Porcentaje de adición de capacidad por tecnología de 2027 a 2037 [10]	8
2.1	Niveles de energía para los tres tipos de materiales [12]	10
2.2	Representación esquemática de los enlaces covalentes en una red cristalina de silicio [11]	11
2.3	Formación de la región de empobrecimiento [12]	12
2.4	Efecto fotovoltaico [11]	14
2.5	Corte transversal de una célula solar [11]	16
2.6	Gráficas de corriente, potencia y voltaje de una celda fotovoltaica. [16]	16
2.7	Representación eléctrica de una celda solar [17]	18
2.8	Tipos de conexión para arreglos fotovoltaicos. (a) arreglo en serie, (b) arreglo en paralelo, (c) arreglo serie-paralelo, (d) arreglo total-cross tied, (e) arreglo bridge-link y (f) arreglo honey-comb [20].	20
2.9	Representación eléctrica de una celda solar en Cadence®Virtuoso.	21
2.10	Curvas características del modelo del diodo único.	21
2.11	(a) Proceso de medición de curvas I-V para celda solar comercial en laboratorio, (b) Curvas I-V obtenidas en Matlab a diferentes irradiancias	22
2.12	Curvas de potencia para dos módulos fotovoltaicos conectados en serie en donde el segundo módulo presenta menor potencia que el primero [23].	23
3.1	Curvas I-V correspondientes a tres niveles de irradiancia y dos de temperatura, donde las curvas negras y grises corresponden a las temperaturas T_1 y T_2 [24].	25
3.2	Módulo fotovoltaico en Cadence®Virtuoso.	31
3.3	Curvas para diferentes niveles de irradiancia en W/m^2 a una temperatura de 25 °C.	32
3.4	Curvas para diferentes niveles de temperatura a una irradiancia de 1000 W/m^2 .	32
3.5	Curvas características mostrando los valores para las especificaciones del módulo fotovoltaico a STC.	33
3.6	Curvas características del módulo solar MX Solar USA MX60-220.	34

3.7	Curvas características correspondientes a un solo módulo (azul) y al arreglo serie paralelo con cuatro módulos (rojo).	34
3.8	Arreglo serie-paralelo con cuatro módulos fotovoltaicos.	35
4.1	Símbolo del switch en Virtuoso.	37
4.2	Estados del switch.	38
4.3	Módulo unitario	39
4.4	Símbolo del módulo unitario en Virtuoso con el caso 010 en serie.	40
4.5	Circuito en Virtuoso para los casos en serie 010, paralelo 101 y solo celda uno 100 o celda dos 001.	41
4.6	Curvas características para combinaciones posibles en el módulo unitario a condiciones STC.	41
4.7	Curvas características para serie (rojo), paralelo (verde), solo celda 1 (morado y azul cielo) y solo celda 2 (naranja y rosa) cuando la irradiancia tiene valores de 800 y 400 W/m^2	43
4.8	Curvas características para serie (rojo), paralelo (verde), solo celda 1 (morado y azul cielo) y solo celda 2 (naranja y rosa) cuando la temperatura tiene valores de 15 y 45 °C.	44
4.9	Curvas características para serie (rojo), paralelo (verde), solo celda 1 (morado y azul cielo) y solo celda 2 (naranja y rosa) cuando la irradiancia tiene valores de 800 y 400 W/m^2 y la temperatura tiene valores de 15 y 45 °C.	44
4.10	Módulo anidado	45
4.11	Curvas características del módulo anidado.	46
4.12	Componentes internos y símbolo del módulo anidado	46
4.13	Conexión del circuito en Virtuoso de dos módulos conectados en serie (010), y la conexión entre ellos también es en serie (010)	49
4.14	Curvas características para el caso en serie	49
4.15	Conexión del circuito en Virtuoso de dos módulos conectados en paralelo (101), y la conexión entre ellos también es en paralelo (101)	51
4.16	Curvas características para el caso en paralelo	51
4.17	Conexión del circuito en Virtuoso correspondiente a la combinación 1.	52
4.18	Curvas características para el caso con la combinación 1.	53
4.19	Conexión del circuito en Virtuoso correspondiente a la combinación 2.	54
4.20	Curvas características para el caso con la combinación 2.	54
4.21	Conexión del circuito en Virtuoso correspondiente a la combinación 2.	56
4.22	Curvas características para el escenario en condiciones variables	56
4.23	Conexión del circuito en Virtuoso mostrando tres escenarios distintos de reconfiguración.	57
4.24	Curvas características para las tres reconfiguraciones distintas.	58
4.25	Conexión del circuito en Virtuoso con el módulo unitario para la simulación transitoria	59
4.26	Respuesta transitoria de los switches S1, S2 Y S3 en el módulo unitario.	60
4.27	Modelo de reconfiguración de la tesis [27].	61

List of Tables

3.1	Especificaciones del módulo fotovoltaico a STC	33
4.1	Conexiones posibles en módulo unitario	38
4.2	Especificaciones del módulo unitario a STC	42
4.3	Especificaciones del módulo anidado a STC	45
4.4	Comparación de las tres diferentes reconfiguraciones.	58
4.5	Tabla comparativa entre ambos trabajos.	62

List of Listings

3.1	Código en VerilogA del módulo fotovoltaico usado para la simulación	28
4.1	Código en VerilogA del switch usado en el diseño del módulo unitario	36