



REGULAR ARTICLE

Physics & Engineering

Simulación de Sombreado para Sistemas Residenciales de Generación Solar Fotovoltaica (SFV) en Entornos Urbano y Rural utilizando System Advisor Model (SAM)

Shading simulation for two photovoltaics solar generation residential systems (SPV) using SAM (System Advisor Model)

Daniela Nolasco  1* | J. S. Solís-Chaves  2†

¹Estudiante de Tecnología en Robótica Industrial

²PhD en Energía Universidad Federal do ABC / Profesor Tiempo Completo Ingeniería Mecatrónica, Universidad ECCI.

Correspondence

Daniela Nolasco
Email: danielaa.nolasco@ecc.edu.co

Present address

*Departamento de Ingeniería Mecatrónica, Universidad ECCI, Bogotá, Colombia.

Copyright : Licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Interna.



Editors: Robert Paul Salazar, Germán Chaparro.

Editorial assistant : Luz Adriana Suárez Suárez.

How to cite

Daniela Nolasco, **Shading simulation for two photovoltaics solar generation residential systems (SPV) using SAM (System Advisor Model)**, TECCIENCIA, Vol. 15, No. 28, 01-10, 2020
DOI:

ABSTRACT.

In this document, shading models are developed for photovoltaic solar generation systems located in two environments, a rural one, in the Cundiboyacense savanna, and the other one within the con-urban area of the Colombian capital. Both systems consider a typical electrical load for an average house. The photovoltaic generation systems and their components are dimensioned based on this estimation, for which, in this case there are not considered battery banks. Shading on the panels is done using SAM, inserting objects of considerable height in both environments. The results of this modeling confirm that indeed, power losses are greater when considering the area of panels affected by shade. Therefore, a comparative simulation case is presented for the two considered environments, including and excluding losses due to the effect of shading, and the respective conclusions are written.

Keywords: Renewable Energies, Photovoltaic Solar Energy, Losses, System Advisor Model, Simulation, Shading.

RESUMEN. En este documento, se desarrolla un modelo de sombreado para sistemas de generación solar fotovoltaica emplazados en dos entornos, uno rural, ubicado en la sabana cundiboyacense y otro dentro del con-urbano de la capital colombiana. Ambos sistemas consideran una carga eléctrica típica para un hogar promedio. A partir de esta estimación se dimensionan los componentes del sistema de generación fotovoltaico. En esta ocasión no se consideran bancos de baterías. El sombreado sobre los paneles se realiza por medio de SAM, insertando objetos de altura considerable en ambos entornos. Los resultados de este modelamiento confirman que efectivamente, las pérdidas de potencia son mayores cuando se considera el área de paneles afectada por la sombra. Se presenta por tanto un caso de simulación comparativa para los dos entornos considerados, uno de estos incluyendo y el otro excluyendo las pérdidas por efecto del sombreado y se escriben las conclusiones respectivas.

Palabras clave: Energías Renovables, Energía Solar Fotovoltaica, Pérdidas, System Advisor Model (SAM), Simulación, Sombreado.

*SAM simulation, references and citations, tables and figures

† Paper organization, grammar, style, results validation

1 | INTRODUCCIÓN

La electricidad es considerada un agente primario en la medición de la riqueza, y es un factor importante en el desarrollo de la economía. Dado el consumo anual promedio por persona (de 80 GJ en 2014) [1], el suministro actual de energía es suficiente para lograr un nivel de vida confortable para todos, el problema está en la distribución equitativa de la energía. Alrededor de un millón de personas no tienen acceso a la electricidad. Uno de los objetivos de la ONU para el 2030 es "Garantizar el acceso a energía asequible, confiable, sostenible y moderna para todos", su meta es hacer que la energía eléctrica llegue a toda la población aumentando el uso de energías renovables [1].

Las energías alternativas o renovables, son aquellas que utilizan recursos inagotables para su producción. Lo valioso de estas energías es que causan poca o nula contaminación al medio ambiente pues disminuyen las emisiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes locales. Así mismo, ayudan a la creación de empleos y al desarrollo tecnológico. Los precios para poder generarlas son elevados, pero poco a poco se han vuelto más accesibles a las personas, llegando a ser utilizados en ambientes domésticos [2].

El sistema solar fotovoltaico (SFV) es uno de los que pueden integrarse de mejor manera en una casa sin interrumpir en el ambiente hogareño. No produce contaminación en el aire ni ruido, y no requiere de un lugar especial para su instalación, solo un espacio libre que cumpla con las dimensiones del sistema. Aunque tiene la fama de ser costoso la realidad es que sus componentes son accesibles al público general [3]. Para que un módulo pueda funcionar necesita de la radiación solar, objetos cercanos a los paneles pueden causar sombreado sobre los arreglos. El sombreado es un problema recurrente en los paneles fotovoltaicos que provoca bajas en la potencia entregada por los módulos. Además, las celdas ensombrecidas se comportan como resistencias, que consumen la energía que es generada por sus vecinas, la energía consumida se convierte en calor, el cual provoca un aumento en la temperatura de la celda dañándola [4].

En el caso de particular se han considerado dos sistemas SFV residenciales, uno en un entorno rural y otro en un entorno urbano. El objetivo es analizar el efecto del sombreado en ambos casos, usando la Calculadora 3D disponible en System Advisor Model (SAM), programa creado por el NREL (Laboratorio Nacional de energías renovables por sus siglas en inglés) [3]. Un par de trabajos interesantes usando este software para la evaluación tecno-económica de sistemas con Energía renovables en Colombia que analizan la posible implementación de una planta geotérmica en el volcán Cerro Machín [5] y la potencial implementación de un sistema híbrido para una edificación universitaria [6] y se consideran como antecedentes para el presente trabajo. La organización de este artículo es la siguiente: En la Sección 2 se muestra el modelado del sistema solar fotovoltaico, entendiendo las partes que lo componen y las ecuaciones principales que rigen su funcionamiento; en la Sección 3 se profundiza en el modelamiento y simulación del sombreado, explicándolo matemáticamente y presentando el modelo en SAM para el cálculo de las pérdidas; en la Sección 4 se muestran los resultados gráficos de las diferentes pérdidas obtenidas. Finalmente se presentan las conclusiones respectivas en la Sección 5 del documento.

2 | MODELADO DEL SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO

En la siguiente sección se presenta el modelado de cada uno de los componentes correspondientes a un sistema solar fotovoltaico, y que deben ser definidos en las distintas pestañas que SAM posee con el fin de obtener una simulación exitosa [3]. De igual manera se muestran algunas ecuaciones para comprender de mejor manera el funcionamiento de estos sistemas y algunas tablas para mostrar las características importantes que se van definiendo sobre nuestro arreglo solar.

2.1 | Recurso Solar

La cantidad de energía solar que se recibe en un área depende de la ubicación, hora del día, y las condiciones climáticas. La potencia que provee el sol es conocida como "irradiancia" y su unidad son los kW/m^2 . [1] En la

figura 1 se puede observar un mapa del recurso solar en las regiones de cobertura del modelo satelital que usa el software SAM [7].

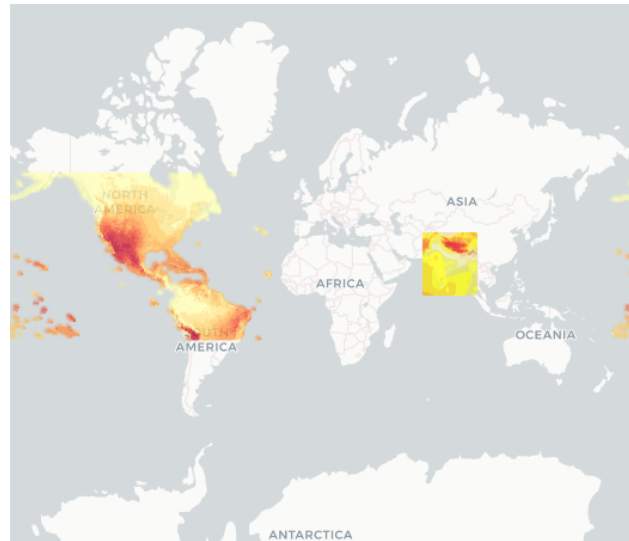


FIG. 1 Mapa de recursos solares. Tomado de la página del NREL [7].

Para obtener el nivel de radiación solar en $kW - h/m^2$ para Bogotá, se utiliza el visor web de la Base de Datos Nacional de Radiación Solar (NSRDB) administrado por el mismo NREL [7], que contiene no solo datos para los Estados Unidos, sino también para una lista creciente de países del mundo. Un resumen de estos conjuntos de datos internacionales se proporciona a continuación en la Tabla 1.

| Región | México/ América Central |
|---------------------|----------------------------------|
| Conjunto de datos | Modelo solar físico (PSM) V. 3,0 |
| Resolución temporal | 1/2 hora |
| Resolución espacial | 4 x 4 km |
| Años abarcados | 1998-2017 |

TABLA 1 Modelo de recursos de datos solares, adaptado de [8].

Los datos disponibles se calcularon utilizando el Modelo Solar Físico (PSM) versión 3,0, esto se explica completamente en [8] y [9].

En la Tabla 2 se muestran las diferentes medidas de irradiancia y otros factores climatológicos para las zonas de Bogotá y Facatativá, los cuales son obtenidos utilizando el recurso solar, que se define en entradas utilizadas por el modelo computacional que se implementa en SAM, y es fundamental para el posterior análisis energético y de eficiencia.

| <i>Tipo de irradiancia/Otro factor</i> | Bogotá | Facatativá |
|----------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| <i>Horizontal global</i> | 4,81 kW-h/m ² /day | 4,8 kW-h/m ² /day |
| <i>Normal Directa</i> | 3,7 kW-h/m ² /day | 3,46 kW-h/m ² /day |
| <i>Horizontal Difusa</i> | 2,5 kW-h/m ² /day | 2,63 kW-h/m ² /day |
| <i>Albedo anual</i> | 0,136 | 0,123 |
| <i>Temperatura promedio</i> | 17,2° C | 13,4° C |
| <i>Elevación</i> | 2 539 msnm | 2 589 msnm |

TABLA 2 Irradiancias en Bogotá y Facatativá. Tomado de [7].

Para ambas locaciones fue necesario considerar las coordenadas geográficas que permitieran la estimación de la radiación solar, un barrio de Bogotá (4,61°N -74,1°O) y un área rural cercana a Facatativá (4,61°N - 74,06°O).

2.2 | Carga Eléctrica

SAM es capaz de sugerir modelos de rendimiento, que van acompañados de modelos financieros para sistemas de generación basados en Energías Renovables. Entre ellos se encuentra el modelo residencial fotovoltaico, seleccionarlo es el primer paso para poder dimensionar el sistema SFV.

En los hogares típicamente se usan diferentes electrodomésticos, los cuales presentan potencias y consumos característicos. En la Tabla 3 se muestran algunos de los más utilizados y la potencia usual de estos [10], con ello se logra modelar el perfil de carga para las dos locaciones del proyecto y que son requeridas por el Software para las estimaciones de consumos.

| Aparato | Potencia (W) |
|-------------------------------|---------------------|
| <i>Lavadora</i> | 500 |
| <i>Televisor</i> | 175 |
| <i>Computadora</i> | 600 |
| <i>Licuada</i> | 300 |
| <i>Bombillo incandescente</i> | 100 |
| <i>Bombillo ahorrador</i> | 20 |
| <i>Bombillo fluorescente</i> | 40 |
| <i>Plancha</i> | 1000 |
| <i>Equipo de sonido</i> | 80 |
| <i>Ducha eléctrica</i> | 3500 |
| <i>Microondas</i> | 1100 |
| <i>Olla arrocera</i> | 1000 |
| <i>Secadora</i> | 1200 |
| <i>Cafetera</i> | 800 |
| <i>Congeladora</i> | 350 |
| <i>Waflera</i> | 700 |
| <i>Refrigeradora</i> | 350 |

TABLA 3 Consumo de Potencia en Electrodomésticos. Adaptado de [10].

Tomando estos datos como base se realizó una estimación propia del consumo eléctrico para un hogar típico del área metropolitana de Bogotá. Para Facatativá se usarán las mismas potencias, pero escaladas en 0,5, considerando que la energía usada de un hogar es mayor en la ciudad que en el área rural. Los perfiles de carga correspondientes se muestran en la Tabla 4, presentándose el consumo eléctrico mes por mes.

| Mes/Ciudad | Bogotá | | Facatativá | |
|------------|-------------------------|-----------------|-------------------------|-----------------|
| | Energía Eléctrica (kWh) | Valor Pico (kW) | Energía Eléctrica (kWh) | Valor Pico (kW) |
| Enero | 723,10 | 1,81 | 361,55 | 0,91 |
| Febrero | 630,66 | 1,72 | 315,22 | 0,86 |
| Marzo | 666,29 | 1,98 | 333,15 | 0,99 |
| Abril | 794,20 | 2,92 | 397,1 | 1,46 |
| Mayo | 1 040,90 | 3,88 | 520,45 | 1,94 |
| Junio | 1 589,92 | 4,26 | 794,96 | 2,13 |
| Julio | 1 926,08 | 4,37 | 963,04 | 2,19 |
| Agosto | 1 730,14 | 4,39 | 865,07 | 2,2 |
| Septiembre | 1 382,64 | 4,21 | 691,32 | 2,11 |
| Octubre | 1 082,88 | 3,79 | 541,44 | 1,9 |
| Noviembre | 634,89 | 1,71 | 317,45 | 0,9 |
| Diciembre | 716,15 | 1,86 | 358,08 | 0,93 |

TABLA 4 Perfiles de Carga Eléctrica para un hogar típico en Bogotá y en Facatativá. Elaboración propia

Se puede evidenciar que para el hogar ubicado en Bogotá se tiene un consumo anual total de 12 917,84kWh con una potencia pico de 4,39kW [3]. También se denota que, para el hogar ubicado en el área rural de Facatativá, se aprecia un consumo de 6 458,92 kWh con una potencia máxima de 2,20 kW.

2.3 | Caracterización de los Sistemas fotovoltaicos Urbano y Rural

Un Sistema SFV está compuesto físicamente por Módulos que contienen las celdas solares fotovoltaicas y al menos un inversor, estos elementos deben ser seleccionados basándose en diferentes criterios como la potencia, la corriente y la tensión de los mismos, para lo cual debe conocerse la tecnología y principio de funcionamiento de ambos. A continuación se resumen el principio de funcionamiento de una celda SFV, la metodología adoptada para la selección de los Módulos y el Inversor, así como el dimensionamiento de ambos sistemas de generación SFV.

2.3.1 | Descripción del funcionamiento de una celda SFV

Las celdas fotovoltaicas están hechas de dos placas delgadas de semiconductor que en su mayoría es silicio. Cuando el silicio está expuesto a la luz solar genera cargas eléctricas, las cuales se conducen por contactos de metal en forma de corriente directa [11].

Existen tres tipos de celdas, policristalinas, monocristalinas y de capa fina, los policristalinas son de rendimiento intermedio y usadas normalmente para instalaciones residenciales, de tal forma que son las más adecuadas para las simulaciones. La figura 2 muestra un esquema de la estructura de una celda solar SFV[11].

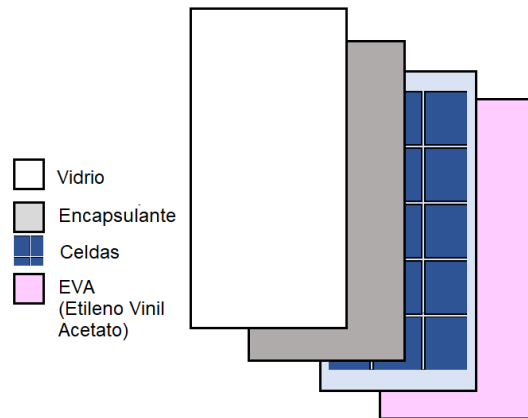


FIG. 2 Estructura de un módulo fotovoltaico. Tomado de [11].

El comportamiento de una celda fotovoltaica es similar a la de un circuito que integra un diodo. En la Figura 3 se presenta el circuito eléctrico equivalente que representa el comportamiento de una celda SFV [12].

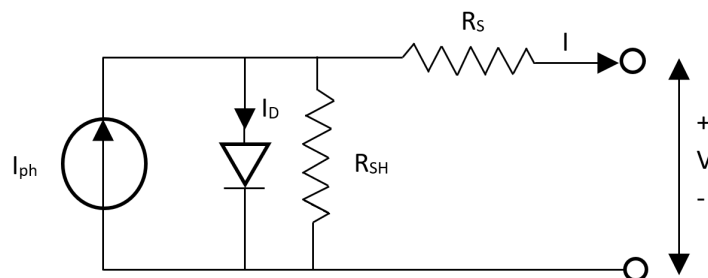


FIG. 3 Circuito con diodo equivalente de una celda fotovoltaica. Tomado de [12].

Donde:

V : Es la tensión a través de la celda.

I_{ph} : es la fuente de corriente equivalente generada por la irradiancia.

R_S : es la resistencia dentro de la celda.

R_{SH} : es una resistencia Shunt.

I_D : - es la corriente a través del diodo.

I : es la corriente neta

Basándose en el circuito en la figura 3, se obtiene la ecuación (1) que describe la ecuación característica de una celda SFV. [1]

$$I = I_{ph} - I_D \quad (1)$$

La corriente en (2) es la que se transitará por la celda. La importancia de la corriente del diodo I_D es que allí se reflejan los cambios asociados con la temperatura sobre la celda SFV. Esta corriente se puede calcular

por medio de la fórmula (2) [12]:

$$I_D = I_o(e^{eV/kT_c} - 1) \quad (2)$$

Las variables que han sido agregadas en la ecuación (2) para esta expresión son:

I_o : Es la corriente de saturación oscura, la cual es la suma de las corrientes generadas por la energía térmica en el módulo

k : Constante de Boltzmann $k = 1,381 \times 10^{-23}$.

T_c es Temperatura absoluta de la celda SFV.

e Carga eléctrica. $e = 1,602 \times 10^{-19}$ Coulomb.

Esta fórmula se representa gráficamente por medio de la curva Intensidad-Tensión [12].

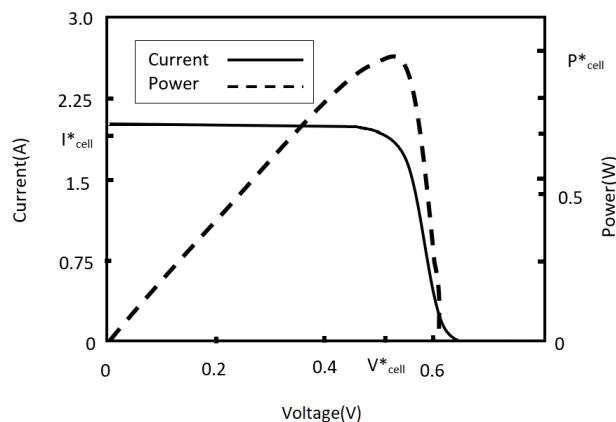


FIG. 4 Curva característica Intensidad-Tensión en un panel SFV. Tomada de [1].

De la misma manera esta curva nos muestra el MPP que es el Punto Máximo de Potencia, en el cual debe trabajar idealmente el módulo allí se genera la máxima producción de energía. Se debe recordar que en la figura 4, el voltaje, la corriente y la potencia están en función de la irradiancia del lugar, si la irradiancia es mayor ambos suben, si es menor ambos bajan. [1]

Para calcular la potencia en los diferentes puntos, se usa la conocida multiplicación entre la Tensión (V) y la Corriente (A) de la gráfica.

2.3.2 | Selección del Módulo SFV

Los módulos fotovoltaicos, son la unión de varias celdas. Se disponen series de celdas para obtener un voltaje adecuado, las cuales se colocan en paralelo para llegar a la potencia necesaria. Un módulo solar fotovoltaico es la parte fundamental de un sistema solar, pues es el que recibe la irradiancia y es el encargado de convertirla en energía eléctrica [1].

Los módulos seleccionados para cada una de las zonas son los encontrados en la Tabla 5 siguientes:

| | Bogotá | Facatativá |
|------------|--------------------------|---------------------------|
| Modelo | Japan Solar JS-305U-RI72 | Hanwha Q.Peak G4.1/SC 305 |
| Tecnología | Multi-c-Si | Multi-c-Si |
| STC | 304,8W | 304,9W |
| PTC | 279,3W | 279,2W |
| Vmp ref | 36,6V | 32,6V |
| Imp ref | 8,33A | 9,35A |
| Largo | 1,96m | 1,67m |
| Ancho | 0,92m | 1,00 m |

TABLA 5 Datos de módulos seleccionados Elaboración propia.

En la Tabla anterior se muestran las potencias STC (Standard Test Conditions) y PTC (PVUSA Test Conditions). La diferencia entre ellas es que la prueba STC es en condiciones ideales con $1 \text{ kW}/\text{m}^2$ de irradiancia, 25°C y una masa de aire de 1,5, mientras la prueba PTC es en condiciones un poco más reales con $1 \text{ kW}/\text{m}^2$ de irradiancia, 1 m/s en velocidad de viento y 20°C . En cuanto al voltaje y la corriente de referencia estos se toman en el MPP del Módulo [13].

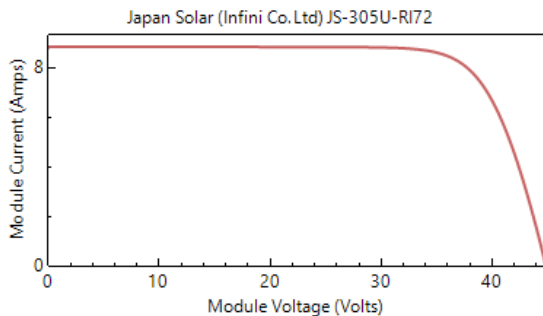


FIG. 5 Curva Intensidad-voltaje del módulo elegido para Bogotá. Obtenida en SAM.

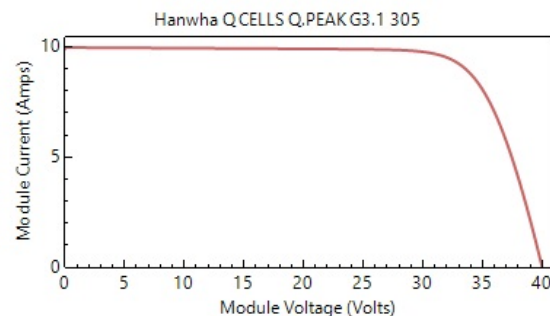


FIG. 6 Curva Intensidad-voltaje del módulo elegido para Facatativá. Obtenida en SAM.

En la figura 5 y 6 se aprecian las curvas Intensidad-voltaje de ambos módulos, que, como se ha definido anteriormente, nos muestran la fórmula de la corriente correspondiente a la celda como función. Se debe tener en cuenta que estas gráficas están pensadas para el momento donde la irradiancia es: $1 \text{ kW}/\text{m}^2$.

La potencia P que se quiere alcanzar con nuestro arreglo será igual al valor pico expresado para el consumo de cada ciudad con un kW adicional. Esto se debe tener en cuenta al momento de crear los arreglos.

Para conocer la cantidad de módulos a utilizar se puede usar la la expresión (3):

$$M_{SFV} = \frac{P}{STC} \quad (3)$$

Donde M_{SFV} representa el número de Módulos SFV, P se refiere a la potencia P que se quiere lograr con el arreglo y STC es la potencia resultante del Test de Condiciones Estándar (Standard Test Condition).

Una vez se determine la cantidad de Módulos, se selecciona la cantidad de cadenas que existirán en el arreglo, esto puede ser definido sin necesidad de una expresión matemática. Sin embargo, dependiendo de la cantidad de módulos de cada cadena así será la tensión en el arreglo. Conocer esta tensión es importante

para el siguiente paso en el diseño del sistema, y para ello se utiliza la ecuación (4):

$$V_{Subarray} = M_{chain} \times V_{mpref} \quad (4)$$

Siendo V_{mpref} la tensión que se encontró en la Tabla 5 y M_{chain} los Módulos SFV por cadena. Al realizar las operaciones anteriores se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 6:

| | Bogotá | Facatativá |
|-----------------------|---------|------------|
| Potencia | ±5,39kW | ±3,20kW |
| Número de módulos | 18 | 10 |
| Cadenas | 3 | 2 |
| Módulos por cadena | 6 | 5 |
| Voltaje en Subarreglo | 219,6 V | 163 V |

TABLA 6 Resultados de las operaciones necesarias para el diseño. Elaboración propia.

2.3.3 | Selección del Inversor

El inversor es el encargado de convertir la corriente directa que proveen los módulos en corriente alterna para alimentar la casa. Para elegirlo correctamente se deben tomar en cuenta las características del módulo a utilizar y de la carga eléctrica. Los datos mostrados en la Tabla 6 son importantes para este paso, pues el inversor debe soportar una potencia igual o mayor a la necesitada por la carga P . En caso que ningún inversor de los que existen en SAM fuese adecuado, entonces se utiliza un número mayor de inversores. Otra característica del inversor es que posee un voltaje en CC máximo, así que su capacidad tiene que ser mayor a la generada por el arreglo solar. Por último se debe seleccionar un inversor que entregue el voltaje en CA estándar utilizado residencialmente en la región. Considerando todo lo anterior se han seleccionado los siguientes inversores.

| | Bogotá | Facatativá |
|---------------------------|----------------|------------|
| Modelo | PVP2000[120 V] | XLGT18A60 |
| Cantidad | 3 | 2 |
| Potencia máxima en CA [W] | 2 000 | 1 800 |
| Tensión en CA [V] | 120 | 120 |
| Tensión máxima en CC [V] | 380 | 480 |

TABLA 7 Resultados de las operaciones necesarios para el diseño. Creación propia.

Así mismo se debe conocer la eficiencia de los inversores seleccionados, a continuación se muestran las curvas de rendimiento en ambos casos:

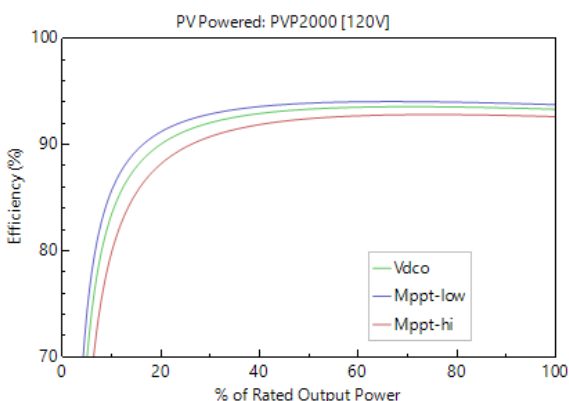


FIG. 7 Curva Eficiencia-Salida de Potencia para Bogotá.

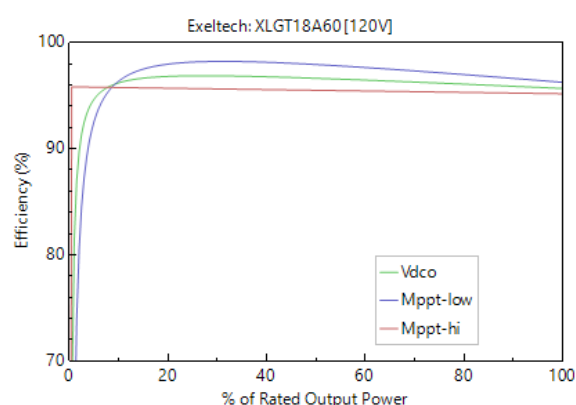


FIG. 8 Curva Eficiencia-Salida de Potencia para Facatativá

En las gráficas 7 y 8 se muestra la eficiencia y salida de potencia para diferentes voltajes, dos de ellos correspondiente al entregado por el MPPT, el cual es el seguidor del punto de máxima potencia (Maximum Power Point Tracker). La tercera curva es de color verde y es el voltaje en corriente continua, el cual es de nuestro mayor interés. En el eje de las abscisas tenemos el porcentaje de la potencia, entendiendo al 100% como la potencia máxima encontrada en la Tabla 7 que al inversor le es posible entregar, así mismo este es dado por la potencia que necesita la carga eléctrica, este porcentaje se encuentra en 73% para Bogotá y 61% para Facatativá. En las ordenadas encontramos la eficiencia, la cual en las gráficas se define dividiendo la potencia de salida entre la potencia de entrada y multiplicándola por 100, para Bogotá al estar en el 73% el inversor tendrá una eficiencia del 92%, mientras en Facatativá se tendrá una del 96%.

2.4 | Resumen de los Sistemas Solares Fotovoltaicos

Los sistemas que se han definido para Bogotá y Facatativá poseen las siguientes características, las cuales se resumen en la Tabla 8:

| Características | Bogotá | Facatativá |
|--------------------------------------|--------------------|--------------------|
| Capacidad de potencia del inversor | 6kW | 3,6kW |
| Potencia de salida en CC del arreglo | 5,49kW | 3,1kW |
| Factor de conversión de CC a CA | 0,91 | 0,85 |
| Estimación del área necesitada | 34,9m ² | 16,7m ² |
| Voltaje máximo en CC | 380v | 480v |
| Módulos en serie | 6 | 5 |
| Cadenas | 3 | 2 |

TABLA 8 Resumen de los Sistemas Solares Fotovoltaicos Considerados. Elaboración propia.

3 | MODELAMIENTO DEL SOMBREADO EN LOS SISTEMAS SFV

El sombreado es uno de los principales problemas que puede tener un sistema fotovoltaico. Esto ocurre mayormente cuando existen objetos cercanos o cuando los paneles acumulan polvo. Este fenómeno resulta en pérdidas de potencia. Una celda solar con sombra puede dar problemas como el efecto punto de calor. La corriente en una celda se comporta de forma diferente, al no haber irradiancia (o haber muy poca), (1) cambia,

y la I_{ph} se suprime por falta de luz solar, de tal manera que ahora se tiene la ecuación (5) :

$$I = -I_o(e^{eV/kT_c} - 1) \quad (5)$$

Se debe recordar que I_D tiene más componentes, los cuales están mostrados en (2). El voltaje a través de la celda que se definió como V , se vuelve negativo con el sombreado. Se supone que ahora la celda se comporta como un diodo polarizado a la inversa, y la corriente no puede ser mayor que I_o , sin embargo esto no ocurre en la práctica y la potencia proporcionada a los módulos decrece. Esto se muestra en la figura 9

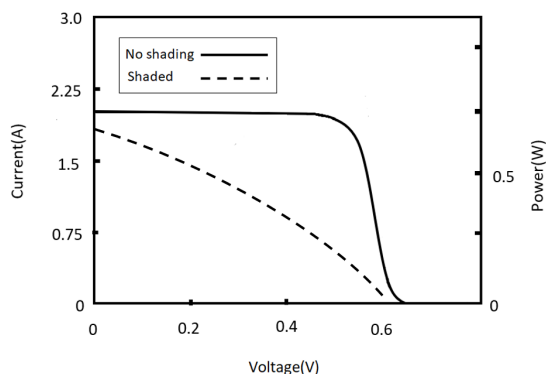


FIG. 9 Pérdida de potencia por sombreado. Tomado de [1].

En la gráfica 9 se puede observar como un módulo muestra pérdidas en la potencia luego de ser afectado por la sombra. Tenerlo en cuenta al momento de realizar la instalación es importante para aumentar la vida de los paneles, además esto permite obtener la máxima eficiencia del sistema. SAM puede medir el impacto que la sombra produce un sistema. Para ello, se utiliza la llamada "Calculadora de Sombra en 3D", existente en la pestaña de "Sombreado y Esquema" en SAM. Al usar esta herramienta será posible emplazar edificaciones y objetos cercanos a los paneles SFV, estos se representan en forma de cajas, techos y cilindros, además se permite incluir árboles. Las superficies activas son los Módulos, y con estos se crean los arreglos fotovoltaicos para terminar la escena y hacer el cálculo automático de las pérdidas [3].

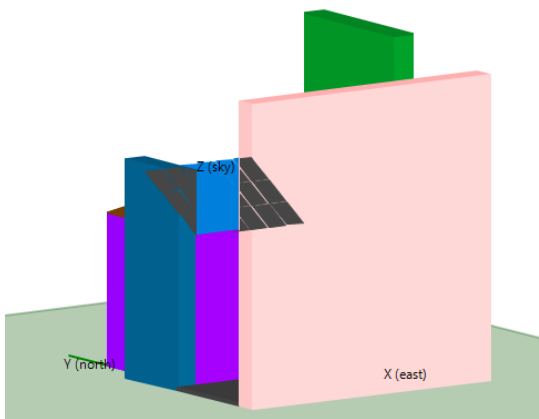


FIG. 10 Modelo de sombreado para la ciudad de Bogotá. Elaboración propia.

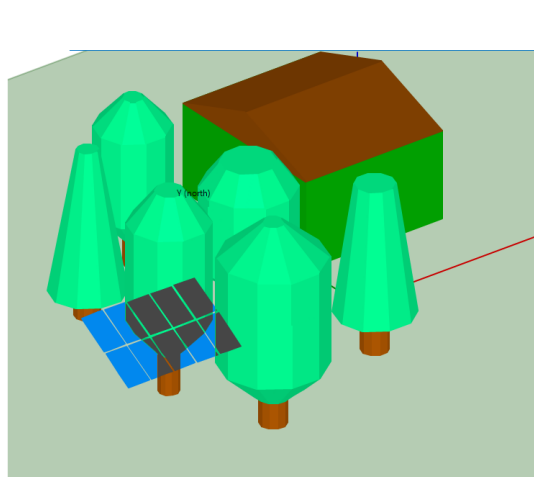


FIG. 11 Modelo con sombreado para la ciudad de Facatativá. Elaboración propia.

Las figuras 10 y 11 son los modelos a los cuales se les ha agregado el sombreado por medio de objetos 3D. En la zona de Bogotá se han elegido cajas, las cuales simulan edificios cercanos, cabe resaltar que la ubicación del arreglo es sobre la casa, por el espacio disponible en el techo, que es un factor a tomar en cuenta en el entorno urbano. En el modelo creado para Facatativá, se consideran árboles como productores de sombra, la ubicación de los paneles es en el suelo un poco alejados de la casa, pues se supone que en un ambiente rural habrá más espacio disponible.

4 | RESULTADOS DE SIMULACIÓN Y DISCUSIÓN

Los resultados de simulación presentados por SAM, luego de haber agregado toda la información necesaria en las pestañas de configuración, se consiguen haciendo click en el botón de "Simular". Lo que se obtiene es una serie de gráficas, en las que se muestran datos relacionados al rendimiento energético y al modelo financiero. En esta pestaña existen subsecciones, en las que se relacionan los diferentes tipos de pérdidas y los perfiles de diferentes variables de interés. En este caso específico se analizarán las pérdidas relacionadas al Inversor y diferentes perfiles de potencia e irradiancia. Las pérdidas de energía se dan por diferentes factores, entre ellos el sombreado; los perfiles son datos de series de tiempo, donde se estiman diferentes promedios para cada mes del año, o de forma anual [3].

4.1 | Sistema SFV en un entorno urbano

El sistema correspondiente a Bogotá en la Tabla 8 se simuló, con y sin sombreado, obteniendo los siguientes resultados:

4.1.1 | Sin Sombreado

Los siguientes datos pertenecen a un arreglo en la ciudad de Bogotá sin tomar en cuenta las pérdidas ocasionadas por la sombra.

A. Pérdidas de potencia nominal

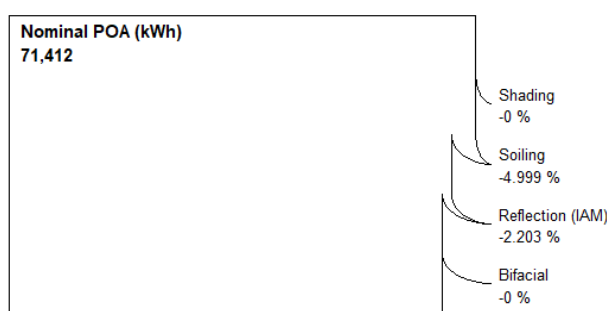


FIG. 12 Pérdidas de potencia nominal para el sistema de la zona urbana cuando no hay sombreado.

Se observan las pérdidas de potencia nominal. El mayor porcentaje de ellas es la relacionada con el polvo, con un 4,559%, seguido por un 2,203% en pérdidas por reflexión, no se tienen pérdidas por sombreado y el módulo seleccionado no es bifacial.

B. Potencia en CC del arreglo

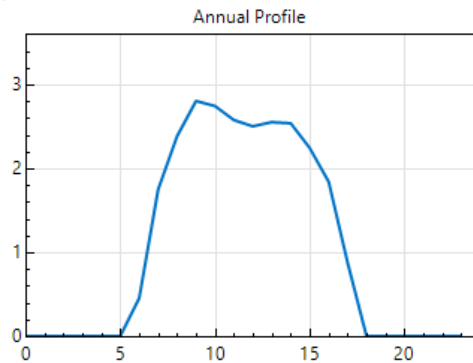


FIG. 13 Potencia en CC en el arreglo fotovoltaico sin sombra en la ciudad de Bogotá.

Se muestra el pico de potencia absorbida por el arreglo SFV, a partir de la radiación incidente, por cada hora en un año. Se muestra que el momento del día con mayor producción de potencia fue entre las 8:00 y las 9:00 horas generándose aproximadamente 2,9 kW.

C. Eficiencia del módulo SFV

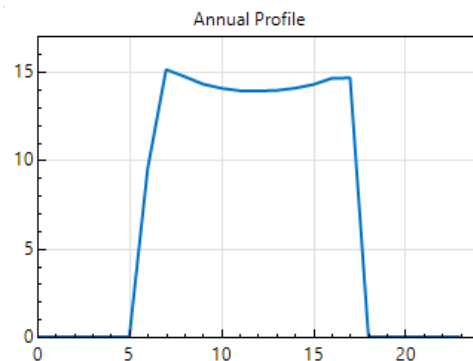


FIG. 14 Eficiencia del módulo para el sistema fotovoltaico de Bogotá no ensombrecido.

La eficiencia del módulo es menor durante las primeras y las últimas horas del día, llegando a reducirse en un 15 % en su punto más bajo durante un año.

4.1.2 | Sistema SFV Urbano con Sombreado

Las figuras 15, 16 y 17 a continuación corresponden a la simulación de un sistema solar fotovoltaico en la ciudad de Bogotá que se encuentra rodeado por objetos que producen sombreado sobre él como se muestra en la figura 10.

A. Pérdidas de potencia nominal

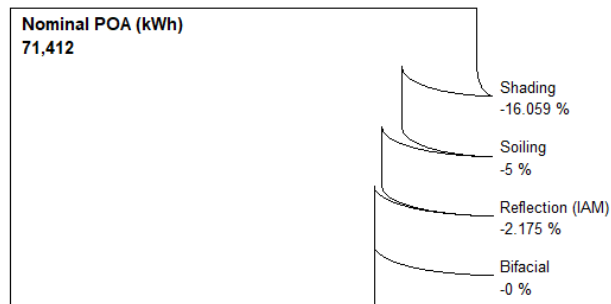


FIG. 15 Pérdidas de potencia nominal para el sistema de la zona urbana cuando existe sombreado.

Se observan las pérdidas de potencia nominal. La mayor de ellas correspondiente a las provocadas por el sombreado siendo esta de un 16,059%, seguida por las pérdidas que ocasiona el polvo que son de 5%, en tercer lugar las pérdidas relacionadas con la reflexión que equivalen a un 2,175%, por último se recalca que el módulo seleccionado no es bifacial.

B. Potencia en CC del arreglo

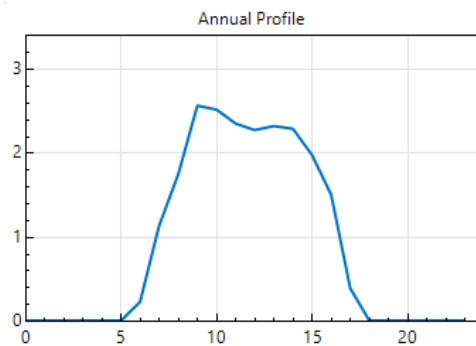


FIG. 16 Potencia en CC en el arreglo fotovoltaico con sombreado en la ciudad de Bogotá.

Se muestra el pico de potencia absorbida por el arreglo SFV, a partir de la radiación incidente, por cada hora en un año. Se muestra que el momento del día con mayor producción de potencia fue entre las 8:00 y las 9:00 horas generándose aproximadamente 2,6 kW.

C. Eficiencia del módulo

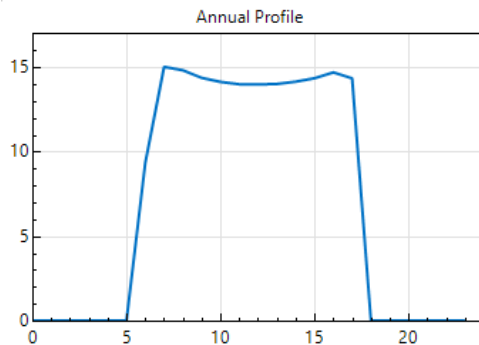


FIG. 17 Eficiencia del módulo para la zona urbana con sombreado.

La eficiencia del módulo es menor durante las primeras horas del día, llegando a perderse un 15% en su momento más bajo en el año.

4.2 | Sistema Fotovoltaico en un entorno Rural

A continuación se presentan las figuras que describen los resultados para un sistema SFV en la ciudad de Facatativá. Se utilizó para ello, el modelo creado y expuesto en la Tabla 8.

4.2.1 | Sistema SFV Rural sin Sombreado

El sistema seleccionado para la ciudad de Facatativá se simuló sin tomar en cuenta pérdidas por sombreado, obteniendo los resultados mostrados:

A. Pérdidas de potencia nominal

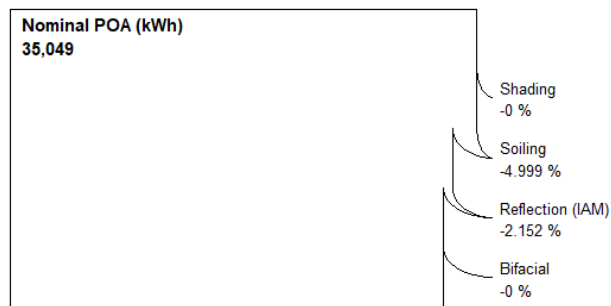


FIG. 18 Pérdidas de potencia nominal sin tomar en cuenta el sombreado para la zona rural.

Se observan las pérdidas de potencia nominal en el área rural. Como la gráfica anterior denota, existe un 4,999% de pérdidas relacionadas con el polvo y un 2,152% con la reflexión de la luz solar. El Módulo seleccionado para este sistema no cuenta con tecnología bifacial.

B. Potencia en CC del arreglo

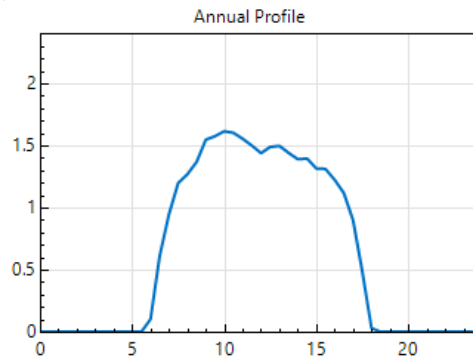


FIG. 19 Potencia en el arreglo para la ciudad de Facatativá sin presencia de sombreado.

Se muestra el pico de potencia absorbida por el arreglo SFV, a partir de la radiación incidente, por cada hora en un año. Se muestra que el momento del día con mayor producción de potencia fue entre las 10:00 y las 12:00 horas generándose aproximadamente 1,5 kW.

C. Eficiencia del módulo

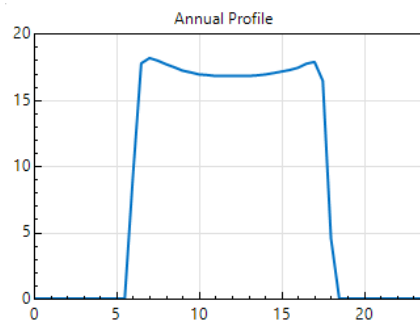


FIG. 20 Eficiencia del módulo para la zona rural sin presencia de sombreado.

La eficiencia del módulo es menor durante las primeras y las últimas horas del día, llegando a perderse hasta un 18% en su momento más bajo durante un año.

4.2.2 | Con Sombreado

En las figuras 21, 22 y 23 que se encuentran a continuación se muestran los resultados obtenidos cuando se agrega sombreado al sistema generado para la ciudad de Facatativá. Se utiliza el modelo de la figura 11.

A. Pérdidas de potencia nominal

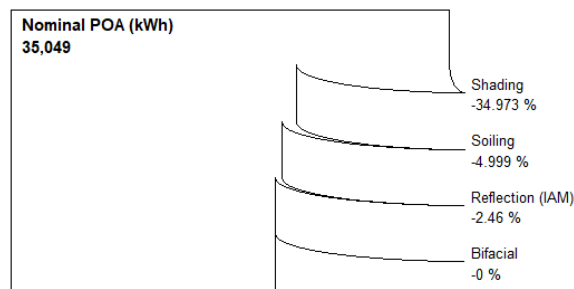


FIG. 21 Pérdidas de potencia en el sistema fotovoltaico sombreado de la ciudad de Facatativá.

Se observan las pérdidas de potencia nominal del arreglo. El mayor porcentaje de ellas es la relacionada con el sombreado llegando a ser un 34,973%, seguido por las pérdidas causadas por el polvo alcanzan el 4,999%, por último, tenemos las pérdidas por reflexión de la luz solar con un 2,46%. El módulo no cuenta con tecnología bifacial.

B. Potencia en CC del arreglo

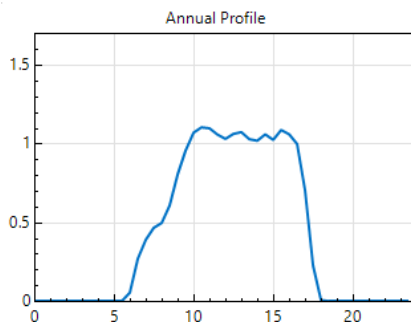


FIG. 22 Potencia del arreglo para el sistema de la ciudad de Facatativá cuando existe sombreado.

Se muestra el pico de potencia absorbida por el arreglo SFV, a partir de la radiación incidente, por cada hora en un año. Se muestra que hubo varios momentos con una generación de energía similar siendo el momento con mayor producción de potencia entre las 10:00 y las 11:00 horas generándose aproximadamente 1,2 kW, y existiendo momentos del días que no logran alcanzar ese máximo pero también son altos a las 12:30, 14:30 y a las 16:00.

C. Eficiencia del módulo

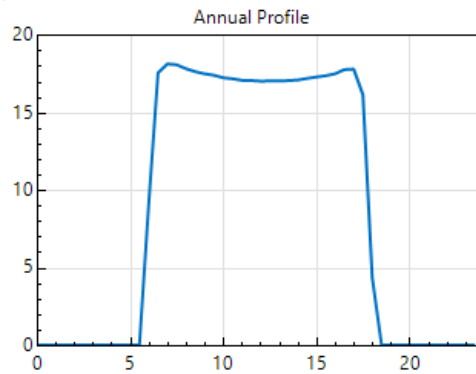


FIG. 23 Eficiencia del módulo para el sistema del área rural sombreado.

La eficiencia del módulo es menor durante las primeras y las últimas horas del día, llegando a perderse hasta un 18% en su momento más bajo durante un año.

5 | CONCLUSIONES

Luego de realizar un análisis con los resultados de simulación, se han sintetizado los datos más relevantes en la Tabla 9, donde se distinguen ambas zonas, y se muestran los sistemas con presencia de sombreado y sin él.

| Ítem | Bogotá | | Facatativá | |
|-----------------------------------------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | <i>Sin sombreado</i> | <i>Con sombreado</i> | <i>Sin sombreado</i> | <i>Con sombreado</i> |
| <i>Porcentaje de pérdidas de potencia nominal por sombreado</i> | 0% | 16,059% | 0% | 34,973% |
| <i>Ejemplo de potencia nominal anual después del sombreado</i> | 8 000kWh | 6 715,28kWh | 5 000kWh | 4 197,05kWh |
| <i>Valor pico de potencia en CC del arreglo</i> | 2,9kW | 2,6kW | 1,5kW | 1,2kW |
| <i>Disminución de eficiencia del módulo</i> | 15% | 15% | 18% | 18% |

TABLA 9 Resumen de las Pérdidas por Shading en los Sistemas SFV para Bogotá y Facatativá

Se puede notar que cuando existe el sombreado, la potencia nominal disminuye en un 16,059% en el área urbana, y un 34,973% en el área rural. Para hacer la diferencia más clara, se muestra un ejemplo en la misma Tabla, para Bogotá se toman 8000kWh entregados anualmente cuando no existe sombreado, al agregarse el efecto se disminuye un aproximado de 1284,72kWh. Mientras, para Facatativá, se suponen 5 000kWh de potencia nominal, que al aplicarse el sombreado disminuyen en 802kWh.

En cuanto a la potencia que es generada por el arreglo cuando existe iluminación plena o sombreado existen ciertas variaciones. Para el área urbana el pico disminuyó en 0,3kW al existir sombreado. De la misma forma en Facatativá el valor pico de la potencia en CC del arreglo disminuyó en 0,3kW.

Por último, la eficiencia del módulo parece ser la misma en ambos casos con y sin sombreado. Para ambos modelos al observar las gráficas se muestra poca variación.

De los datos anteriores se puede concluir que el sombreado provoca una disminución en la potencia que es entregada a la casa para suplir el consumo del lugar, el problema afecta directamente a la potencia entregada por los paneles los cuales reciben el sombreado, más no al inversor u otras partes del sistema.

En este caso en específico es necesario deslastrar cargas no críticas, puesto que no existe un sistema de baterías de respaldo que suministre la energía perdida por causa del ensombrecimiento. Existen otras formas para prevenir los efectos del sombreado en los sistemas SFV *Infinite Energy*, implementando componentes adicionales al sistema, lo que aumenta el costo total del mismo. Algunos de ellos se presentan en [14], a continuación, para la consideración en trabajos futuros, como continuación de esta investigación:

1. **Micro inversores:** Reemplazando el uso de un inversor central se utilizan varios pequeños inversores en la parte trasera de cada panel. En este caso se suprime la dependencia de cada módulo a sus vecinos, y si alguno recibiera sombra los demás no se verían afectados.
2. **Optimizadores de potencia:** De la misma manera que los micro inversores tenemos un componente adicional, el cual se ubica en la parte trasera de cada panel. Por otra parte estos trabajan con cadenas de inversores, los cuales cumplen su tarea en la inversión, esto para lograr la máxima recolección de energía en los paneles. Se optimiza de manera efectiva la salida de energía a nivel del módulo y se evita el desajuste de energía entre módulos, lo que disminuye las pérdidas por sombreado.
3. **Paneles SunPower:** Gracias a su diseño único de circuito en paralelo, los paneles SunPower limitan las pérdidas por sombreado al área afectada. Su tecnología permite que la energía circule aun cuando la celda no está iluminada.

References

- [1] H. Louie, *Off-Grid Electrical Systems in Developing Countries*. Springer, 2018.
- [2] F. André, L. Lejarriaga, and E. Cerdá, "Las energías renovables en el ámbito internacional," *Cuadernos Económicos ICE*, no. 3, pp. 11–12,, 2017. DOI: [10.32796/cice.2012.83.6031](https://doi.org/10.32796/cice.2012.83.6031)
- [3] P. Gilman, A. Dobos, N. DiOrio, J. Freeman, S. Janzouand, and D. Ryberg, *SAM Photovoltaic Model Technical Reference Update*. National Renewable Energy Laboratory, 2018.
- [4] A. Mehiri, A.-K. Hamid, and S. Almazrouei, "The effect of shading with different pv array configurations on the grid-connected pv system," pp. 1–6, 12 2017. DOI: [10.1109/IRSEC.2017.8477420](https://doi.org/10.1109/IRSEC.2017.8477420)
- [5] H. Pantano, V. Betancourt, C. Rocha-Osorio, and J. S. Solís-Chaves, "Techno-economic simulation of a geothermal energy generation system at the Machin Volcano in Colombia," 08 2020.
- [6] A. R. Guevara, "Análisis de prefactibilidad técnica y económica para un sistema híbrido de energía renovable para la sede p," Master's thesis, Facultad de Ingenierías de la Universidad ECCI, not published.
- [7] NREL, "National solar radiation database." web, 11 2019.
- [8] R. Perez, P. Ineichen, M. Kmiecik, K. Moore, D. Renne, and R. George, "Producing satellite-derived irradiances in complex arid terrain," *Solar Energy*, vol. 77, no. 4, pp. 367 – 371, 2004. The American Solar Energy Society's Solar 2003 Special Issue.
- [9] R. Perez, P. Ineichen, K. Moore, M. Kmiecik, C. Chain, R. George, and F. Vignola, "A new operational model for satellite-derived irradiances: description and validation," *Solar Energy*, vol. 73, no. 5, pp. 307 – 317, 2002. DOI: [10.1016/S0038-092X\(02\)00122-6](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(02)00122-6)
- [10] Organismo Supervisor de la Inversión Energética (Osiner), *Guía para calcular el consumo eléctrico doméstico*.
- [11] M. D. Archer and R. Hill, *Clean Electricity from Fotovoltaics*. Series on Photoconversion of Solar Energy, 2001.
- [12] S. A. Kalogirou, *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*. Elsevier Inc., 2014.
- [13] C. Whitaker and J. Newmiller, "Photovoltaic module energy rating procedure," tech. rep., National Renewable Energy Laboratory, 1998.
- [14] Infinite Energy, "Shading and solar PV systems." web, 4 2017.