

Assessment of computing tools for photovoltaic system analysis

INGENIERÍA ELÉCTRICA

Evaluación de herramientas computacionales para análisis de sistemas fotovoltaicos

Luis A. Foronda-Gutiérrez¹, Luz A. Trejos-Grisales¹, Daniel González-Montoya¹¹*Instituto Tecnológico Metropolitano, Facultad de Ingenierías, Medellín, Colombia*

luisforonda259082@correo.itm.edu.co, §adrianatrejos@itm.edu.co, danielgonzalez@itm.edu.co

Recibido: 8 de agosto de 2021 – Aceptado: 2 de noviembre de 2021

Abstract

This paper presents a comparison of some simulation tools for photovoltaic systems. The analysis was made considering four criteria: historical citations, accessibility, user friendliness and simulation. Each criterion includes aspects which have a score assignation. Finally, a weighing was made to define the computational tool with more advantages. The simulation software with more advantages for photovoltaic system simulation are PVSyst and PV*SOL. Both its interface and the information given in the simulation, made them very complete tools for the analysis of the energy production in this kind of systems. Simulation software are needed for the analysis of the operation of photovoltaic systems. Among the most used are: PVSyst, PV*SOL, SAM and RETScreen. The evaluation of these tools allowed to identify that PV*SOL is the software with more advantages and strengths.

Keywords: Photovoltaic system, PV, Simulation, Software, Shading.

Resumen

En este artículo se presenta la comparación de algunas herramientas de simulación para sistemas fotovoltaicos. El análisis se realizó considerando cuatro criterios: histórico de citas, accesibilidad, amabilidad con el usuario y simulación. Cada uno de estos criterios incluye aspectos a los cuales se les asignaron puntajes. Finalmente, se realizó la ponderación de los puntajes para definir la herramienta computacional con más ventajas. Los programas para simulación de sistemas fotovoltaicos con más ventajas para la simulación de sistemas fotovoltaicos son el PVSyst y el PV*SOL. Tanto su interfaz, como la información arrojada en la simulación, los hacen herramientas muy completas para el análisis de producción de energía de este tipo de sistemas. Los programas de simulación son necesarios para el análisis de la operación de sistemas fotovoltaicos. Entre los más utilizados se encuentran: PVSyst, PV*SOL, SAM y

Como citar:

Foronda-Gutiérrez LA, Trejos-Grisales LA, González-Montoya D. Evaluación de herramientas computacionales para análisis de sistemas fotovoltaicos. *INGENIERÍA Y COMPETITIVIDAD*, 2022; e21511516. <https://doi.org/10.25100/iyv.v24i2.11516>



RETScreen. La evaluación de las herramientas permitió identificar que PV*SOL es el programa con más ventajas y fortalezas.

Palabras clave: Sistema fotovoltaico, Simulación, Software, Sombreado.

1. Introducción

La optimización de recursos energéticos, sumada a la sostenibilidad ambiental y a la necesidad de satisfacer la creciente demanda energética de forma confiable, han generado un amplio espacio de trabajo para las energías renovables (1). A final del 2020 estas fuentes registraron una capacidad instalada global de 2799 GW (2). Este crecimiento significativo se debe en gran medida a la disminución de los precios de las tecnologías de generación, a los incrementos en inversión y al planteamiento de nuevas políticas energéticas (3). La fuente no convencional de energía que contribuye en mayor medida es la solar fotovoltaica con 97 GW de la capacidad instalada para 2018 (2). A 2023 se espera un crecimiento del 46% con respecto a las instalaciones de energía renovable, considerando los sistemas fotovoltaicos (SFV) como los responsables de más de la mitad de esa expansión (4).

En Colombia las energías renovables se impulsaron con la aprobación de la Ley 1715 (5), que establece los instrumentos de promoción para el aprovechamiento de Fuentes No convencionales de Energía (FNCE). Esta ley plantea beneficios tributarios como reducción anual de renta, exclusión de IVA, exención de aranceles y depreciación acelerada de activos, entre otros. Para finales de febrero de 2019, la UPME dio certificaciones de aval de incentivos a 387 proyectos FCNE, de un total de 548 solicitudes recibidas. De los 387 proyectos aprobados, el 91.21% corresponden a sistemas solares fotovoltaicos, relacionados con proyectos de hasta 1 MW de capacidad instalada, que suman aproximadamente 958.3 MW (6).

Colombia cuenta con una irradiación promedio de 3.9 kWh/m²/día, la cual está muy por encima del

promedio de Alemania, uno de los países con mayor capacidad solar fotovoltaica instalada. Algunas regiones colombianas que están por encima del promedio nacional son Guajira (6 kWh/m²/día), Costa Atlántica (5 kWh/m²/día), y la Orinoquia y la Región Andina (4.5 kWh/m²/día) (7). Ambos factores, los incentivos tributarios y el potencial energético, han propiciado el crecimiento de la tecnología solar fotovoltaica en Colombia en los sectores comercial e industrial, además de presentarse como solución de abastecimiento eléctrico en las zonas no interconectadas (ZNI).

1.1. Características básicas del análisis de sistemas fotovoltaicos

Los sistemas fotovoltaicos se diseñan basados en la información de la carga a alimentar y el potencial de energía del lugar de la instalación. La eficiencia en la generación de energía en un sistema fotovoltaico está determinada por condiciones ambientales como la radiación solar en el panel, la temperatura y la mitigación de pérdidas (8). La radiación solar incidente tiene un componente aleatorio que hace imposible saber con exactitud cuánta energía recibirá el sistema durante un período determinado; por tanto, se debe calcular el tamaño del sistema fotovoltaico y el de almacenamiento de energía a través de métodos de análisis, los cuales se clasifican en intuitivos, analíticos y numéricos (9).

Uno de los enfoques intuitivos más utilizados para sistemas aislados es el método del "peor mes"; el balance de energía por mes se calcula y el parámetro para la entrada de energía se toma como el mes con las peores condiciones para el sistema (9). Por otro lado, los métodos analíticos se basan en el uso de ecuaciones y son utilizados tanto para sistemas aislados como para sistemas

conectados a la red; estos métodos intentan describir el tamaño del sistema como una función de confiabilidad.

La principal desventaja de estos métodos es que o no son lo suficientemente precisos o requieren la determinación de coeficientes para las expresiones de cada ubicación. Su mayor ventaja es que el cálculo de los diferentes tamaños de subsistemas es muy simple (paneles solares, regulador, baterías e inversor) (8). Finalmente, los métodos numéricos se basan en herramientas de simulación o software. Estas herramientas especializadas permiten proyectar el comportamiento del sistema ante unas condiciones de operación y en un periodo de tiempo, generalmente un día o una hora, para el cual se calcula el balance de energía del sistema. Estos métodos ofrecen la ventaja de ser más precisos, y el concepto de confiabilidad energética se puede aplicar de manera cuantitativa. La fiabilidad del sistema se define como el porcentaje de carga generada por el sistema fotovoltaico durante largos periodos de tiempo.

Estos métodos permiten optimizar el costo energético y económico del sistema (8). Sin embargo, entre sus desventajas se encuentran sus costos, complejidad para cargar los datos y características del sistema que se quiere analizar, etc. Este trabajo está enfocado en la evaluación de herramientas correspondientes a los métodos numéricos para análisis de sistemas fotovoltaicos. Ante el creciente interés en los sistemas fotovoltaicos en nuestro país, se requiere información que permita guiar tanto a la comunidad académica como a la industria. La evaluación de herramientas se hace con el fin de proporcionar al lector un panorama sobre los principales programas de cómputo utilizados en el mundo para la simulación de este tipo de sistemas y sus principales características de uso.

2. Metodología

Se realizó una revisión de al menos 200 artículos científicos de revistas indexadas con el fin de identificar herramientas de simulación de sistemas fotovoltaicos aislados o conectados a la red que permitan hacer el análisis del comportamiento del sombreado y el impacto que este tiene sobre los sistemas fotovoltaicos. Se realizó un proceso de selección de herramientas y se simuló un arreglo 1x3 conectado en serie. Las herramientas encontradas en general requieren las mismas condiciones de instalación en términos de procesador, memoria y sistema operativo. A continuación, se describen de forma general las herramientas encontradas.

2.1. Herramientas de simulación de sistemas fotovoltaicos

2.1.1. RETScreen

Es una herramienta creada por *Natural Resources Canada*. Se enfoca en la gestión de energía limpia para el análisis continuo del rendimiento energético (10). Es también utilizada con una herramienta de evaluación económica.

2.1.2. TRNSYS

Es un software de simulación de sistemas transitorios con una estructura modular. La biblioteca incluye muchos componentes comúnmente encontrados en sistemas de energía térmica y eléctrica, así como rutinas de componentes para manejar entrada de datos meteorológicos (10).

2.1.3. HOMER (Hybrid Optimization of Multiple Electric Renewables)

Creado por *National Renewable Energy Laboratory*, este software se enfoca en optimizar el diseño de micro-redes en todos los sectores,

desde la energía de las aldeas y las islas hasta los campus conectados a la red y las bases militares. Este simplifica la tarea de evaluar diseños tanto para sistemas de energía conectados a la red como fuera de ella (12).

2.1.4. INSEL

Creado por *Insel Company* de Alemania, es un sistema de simulación de diagrama de bloques para aplicaciones de programación de todo el campo de las tecnologías de energía renovable. Este software se puede combinar con las funcionalidades de MATLAB y Simulink (13).

2.1.5. PV F-Chart

Es un programa de análisis y diseño de sistemas solares fotovoltaicos. Proporciona estimaciones de rendimiento promedio mensual para cada hora del día. La forma de cálculo fue desarrollada en la universidad de Wisconsin, Madison en Estados Unidos (14) y se basa en la capacidad de utilización de la radiación solar para dar cuenta de la variación estadística de la radiación y la carga.

2.1.6. Solar Advisor Model (SAM):

Es un software que estima predicciones de rendimiento y costo de la energía para proyectos eléctricos conectados a la red en función de los costos de instalación, operación y los parámetros de diseño del sistema fotovoltaico. Fue creado por el *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) (15). Es también utilizada con una herramienta de evaluación económica.

2.1.7. PVsyst:

Este programa desarrollado por el Instituto de Ciencias Ambientales (ISE) en Suiza, está

orientado al diseño de sistemas solares fotovoltaicos y realiza simulaciones detalladas por hora. Las herramientas incluyen la gestión de base de datos meteorológicos (alrededor de 330 sitios del mundo), base de datos de componentes (más de 1750 módulos fotovoltaicos, 650 inversores, casi 100 bombas solares y docenas de baterías o modelos de reguladores), herramientas gráficas o tubulares específicas, herramienta 3-D CAD (*Computer Aided Design*) (16). Es una herramienta de análisis y planeación.

2.1.8. SolarDesignTool:

Este programa de diseño de sistemas solares fotovoltaicos permite generar un paquete que incluye resumen del proyecto, plano del sitio, planos unifilares, detalles del accesorio de fijación, plan de seguridad contra incendios, fichas técnicas de los equipos y certificaciones, entre otros. Fue desarrollado por *Verdiseno, Inc* (17).

2.1.9. ESP-r 11.5:

Esta herramienta desarrollada por la Universidad de Strathclyde, está orientada al modelado para construir simulaciones de rendimiento energético. El sistema está equipado para modelar calor, aire, luz, humedad y energía eléctrica a una resolución espacial y temporal especificada por el usuario (18).

2.1.10. SolarPro:

Es un software para simulación de sistemas solares fotovoltaicos en un ambiente CAD 3D; este calcula la curva I-V de los módulos en función de las características de fábrica, la cantidad de energía eléctrica generada en función

de las latitudes, longitudes y condiciones climáticas del sitio de instalación, determina los componentes necesarios para instalar el sistema PV automáticamente en función de la configuración, entre otros. Fue desarrollado por *Laplace System Co* en Japón (19).

2.1.11. PV DesignPro-G:

Creado por *Maui Solar Energy Software Corporation* en Estados Unidos, se enfoca en el diseño para simular sistemas de energía solar fotovoltaica por hora durante un año según el clima y el diseño del sistema seleccionados por el usuario. Este puede simular tres tipos de sistemas: sistemas independientes con almacenamiento por baterías, sistemas conectados a la red sin almacenamiento por baterías y para sistemas de bombeo de agua (20).

2.1.12. PV*SOL Expert:

Es un programa de simulación dinámica fotovoltaica con visualización 3D y análisis detallado de sombreado de sistemas fotovoltaicos con sistemas de almacenamiento. Fue desarrollado en Alemania por *Valentin Software GmbH* (12). Es una herramienta de análisis y planeación.

De las herramientas encontradas en la literatura, se eligieron cuatro: RETScreen Expert, SAM, PVSyst y PV*SOL. Para la selección de estos cuatro programas computacionales se tuvo en cuenta que tuvieran licencia gratuita o de prueba por 30 días y que tuvieran la posibilidad de simular el comportamiento dinámico del sol dependiendo de la ubicación geográfica del lugar de la instalación. Adicionalmente, se encontró una alta tendencia al uso de estas herramientas en la literatura consultada. En las siguientes secciones de este artículo se describe la metodología de evaluación de las cuatro

herramientas elegidas y se presentan los resultados y las conclusiones de dicha evaluación.

Para evaluar las herramientas seleccionadas se definieron cuatro criterios: histórico de citas, accesibilidad, amabilidad con el usuario y simulación. A continuación, se describe cada uno de ellos.

2.2. Histórico de citas

Este criterio se basa en la búsqueda realizada en la base de datos Scopus con la palabra clave “solar energy” desde el 2010 hasta el 2020. Se definió una puntuación que se obtiene al multiplicar el valor obtenido de ecuación (1) por 10. Por tanto, la máxima puntuación es de 10 puntos.

$$\text{Puntaje} = \frac{\sum \text{número de citas}}{\sum \text{número de citas del software más cita}} \quad (1)$$

2.3. Accesibilidad

Este criterio se refiere al tipo de licencia, gratuita o versión de prueba de los programas de cómputo seleccionados, entendiendo como gratuita el tipo de licencia que no requiere de pago para utilizar la herramienta y versión de prueba como la licencia que el tiempo de uso es limitado y después de dicho tiempo debe pagarse por utilizar la herramienta. La puntuación para la evaluación se asignó de la siguiente forma: licencia gratuita 10 puntos y versión de prueba 5 puntos.

2.4. Amabilidad con el usuario

En la evaluación de este criterio se tuvieron en cuenta los ítems: versatilidad en herramientas de modelado, realismo en el entorno 3D y manejo intuitivo en el entorno 3D. En la puntuación para la evaluación se le asignó 25 puntos.

2.5. Simulación

Para la evaluación de este criterio se realizó una simulación en cada uno de los programas estudiados. Para esta se utilizaron 3 paneles de 260 W_p, teniendo así un arreglo 1x3 conectado en serie, un micro inversor por panel y una fuente de sombreado (Árbol). A continuación, los criterios de selección y la puntuación de estos:

- Interfaz 3D: 20 puntos
- Posibilidad de carga del horizonte: 15 puntos

Intervalo de tiempo en los resultados obtenidos de sombreado: meses 10 puntos y horas 20 puntos.

3. Resultados

De acuerdo con la metodología descrita, en esta sección se presentan los resultados de la evaluación de los criterios descritos anteriormente en cuatro herramientas seleccionadas. Finalmente, se realizó la ponderación de los resultados de la evaluación con el fin de concluir acerca de la capacidad de las herramientas.

3.1. Citaciones

En la Tabla 1 se muestra el total de citaciones de cada software y la puntuación obtenida teniendo en cuenta la Ec. 1. Para esto se tiene en cuenta de que el criterio “citaciones históricas” tiene un peso de 10%. Como se mencionó en la sección Metodología, en la revisión bibliográfica solo se tuvieron en cuenta artículos de revistas indexadas.

Tabla 1. Ponderación histórica de citaciones

Software	Total citaciones	Puntuación
RETScreen Expert	54	6.7%
SAM	81	10%
PVsyst	66	8.1%
PV*SOL	7	0.9%

Fuente: propia

3.2. Accesibilidad

Este criterio tiene como fin identificar las condiciones de acceso al software, es decir, su costo, sus condiciones de uso, etc. A continuación, se describen dichos aspectos para cada herramienta.

3.2.1. RETScreen Expert

Es gratuito en modo de visualización, por tanto, no es posible descargar un informe o guardar el proyecto que se esté trabajando para retomarlo posteriormente. El costo del paquete para acceder a las características mencionadas es US\$ 869 por un año.

3.2.2. SAM (System Advisor Model)

Tiene licencia gratuita y permite descargar el informe de simulación en formato PDF.

3.2.3. PVSyst

Cuenta con una licencia de prueba de 30 días, a partir de los cuales se deberá hacer pagar. La licencia PRO30 (para instalaciones hasta 30 kW) tiene un costo de 1000 CHF (Franco Suizo), para acceder a una segunda licencia el costo es de 700 CHF. La licencia PREMIUM (para todas las

instalaciones, incluye un año de actualizaciones) tiene un costo de 1300 CHF, para acceder a una segunda licencia el costo es de 1000 CHF y la tercera licencia es de 700 CHF.

3.2.4. PV*SOL

Tiene una licencia de prueba de 30 días, a partir de los cuales se deberá hacer el pago de la licencia profesional. Su costo es de €1.295, esta licencia cuenta con un único usuario y 6 meses de mantenimiento del software.

En la Tabla 2 se muestra el tipo de licencia (versión de prueba o libre), se realiza la ponderación y se muestra el porcentaje obtenido para cada software. Los programas que tiene versión gratuita tienen 10% y los de versión de prueba se les asigna 5%.

Tabla 2. Tipo de versión de softwares

Software	Versión libre	Versión de prueba	Puntuación
RETScreen Expert	✓		10%
SAM	✓		10%
PVSyst		✓	5%
PV*SOL		✓	5%

Fuente: propia

3.3. Amabilidad con el usuario

Para evaluar este criterio, se aplicó una encuesta a 10 ingenieros con experiencia en el tema solar y que se desempeñan tanto en la industria como en la academia. Las personas encuestadas saben de la existencia de las herramientas, pero no las conocen en profundidad. Sin embargo, una sola persona trabaja habitualmente con el software PV*SOL. En la Tabla 3 se muestran los resultados la calificación de cada ítem en este criterio que se definió desde 0 hasta 10. Teniendo en cuenta que el criterio evaluado tiene un peso de 25%, en la Tabla 4, se muestran los valores obtenidos por cada ítem porcentualmente.

Tabla 3. Evaluación Amabilidad con el usuario

Software	Versatilidad en herramientas para modelado 3D	Realismo en el entorno 3D	Intuitividad para el manejo del software
RETScreen Expert	0	0	10
SAM	6	3	5
PVSyst	7	6	5
PV*SOL	10	10	10

Fuente: propia

Los resultados consignados en las tablas concuerdan con algunos trabajos encontradas en la literatura en donde se resalta la amabilidad con el usuario del software SAM (21, 22), PV*SOL (23) y PVSyst (24).

Tabla 4. Ponderación Amabilidad con el usuario

Software	Versatilidad en herramientas de modelado	Realismo en el entorno 3D	Intuitividad para el manejo
RETScreen Expert	0%	0%	8.3%
SAM	5%	2.5%	4.2%
PVSyst	5.8%	5%	4.2%
PV*SOL	8.3%	8.3%	8.3%

Fuente: propia

3.4. Simulación

Como se mencionó en la metodología, para evaluar este criterio se tuvieron en cuenta los ítems: Interfaz 3D, posibilidad de cargar el horizonte y la frecuencia de resultados. Para la evaluación de estos ítems se consideró un mismo caso de estudio que fue descrito anteriormente. A continuación, se presentan los resultados de la simulación para cada herramienta.

3.4.1. RETScreen Expert:

En la Figura 1 se muestran los datos climáticos que entrega el programa al momento de ingresar el lugar geográfico para la simulación, para el

caso, se muestran los datos geográficos de Medellín – Colombia.

RETScreen Expert no cuenta con entorno 3D y no es posible cargar el horizonte. Algunas variables, tales como: ángulo de inclinación de los paneles, número de paneles que habrá en el arreglo, acimut, entre otros, se deben insertar en tablas. El software por defecto asume el tipo de conexión de

los paneles y solicita al usuario ingresar el porcentaje de pérdidas del sistema debido a fuentes diversas que el modelo de simulación no considera por sí solo, tales como suciedad en los módulos, pérdidas por sombreado y pérdidas por cableado; la herramienta de ayuda del programa sugiere que se asuma un 15% en estas pérdidas. En la Figura 2 se muestra la interfaz de simulación del programa.

Mes	Temperatura del aire	Humedad relativa	Precipitación	Radiación solar diaria - horizontal	Presión atmosférica	Velocidad del Viento	Temperatura del suelo
	°C	%	mm	kWh/m ² /d	kPa	m/s	°C
Enero	22,2	67,5%	142,32	4,33	85,5	4,6	21,8
Febrero	22,2	67,5%	164,19	4,61	85,4	4,6	22,8
Marzo	22,8	69,0%	211,44	4,72	85,4	4,6	22,8
Abril	22,2	73,0%	272,52	4,64	85,4	4,6	22,8
Mayo	22,2	74,0%	347,63	4,58	85,5	4,1	22,5
Junio	22,8	69,0%	309,10	4,81	85,5	4,1	22,2
Julio	22,2	65,5%	276,61	5,56	85,5	4,1	22,3
Agosto	22,2	67,0%	285,31	5,22	85,5	3,6	22,7
Setiembre	22,2	72,0%	325,34	4,69	85,5	4,1	22,2
Octubre	21,7	76,5%	307,54	4,39	85,5	3,6	21,7
Noviembre	21,7	75,5%	237,26	4,33	85,5	4,1	21,4
Diciembre	21,7	73,5%	176,34	4,28	85,5	4,6	21,6
Anual	22,2	70,8%	3.055,60	4,68	85,5	4,2	22,2
Fuente	Suelo	Suelo	NASA	Suelo	Suelo	Suelo	NASA

Figura 1. Datos atmosféricos entregados por RETScreen. Fuente: propia

Fotovoltaico

Tipo: mono-Si

Capacidad de generación eléctrica: kW (0,78)

Fabricante: Jinko Solar

Modelo: mono-Si - JKM260M-60

Número de unidades: 3

Eficiencia: 15,89%

Temperatura normal de operación de las celdas: °C (45)

Coefficiente de temperatura: % / °C (0,4%)

Área del colector solar: m² (4,9)

Pérdidas varias: % (Estimación de pérdidas)

Inversor

Eficiencia: % (95%)

Capacidad: kW (0,78)

Pérdidas varias: % (15%)

Figura 2. Interfaz de simulación RETScreen. Fuente: propia

3.4.2. SAM (System Advisor Model):

Como se ilustra en la Figura 3 el software cuenta con entorno 3D y se carga el horizonte a través de la misma interfaz. El programa por defecto asume el tipo de conexión de los paneles y calcula las

pérdidas anuales debidas a sombreado esto lo hace en una matriz donde expresa el porcentaje de pérdidas.

Cuando se inicia la simulación en SAM, se debe seleccionar el sitio de instalación del sistema solar

y así cargar los datos climáticos. Al cargar el sistema 3D, se debe hacer un análisis de sombreado, éste muestra las pérdidas durante 12 horas del día en cada uno de los meses del año. Una vez finalizada la simulación de sombreado, SAM tiene la opción de descargar un archivo en formato SVC el cual tiene datos de pérdidas y se tiene la opción de descargarlo cada 1, 5, 10, 15, 20, 30 o 60 minutos.

3.4.3. PVSyst:

Como se muestra en la Figura 4, el software cuenta con entorno 3D y se carga el horizonte a través de la misma interfaz. El programa por defecto asume el tipo de conexión de los paneles y calcula las pérdidas anuales debidas al sombreado.

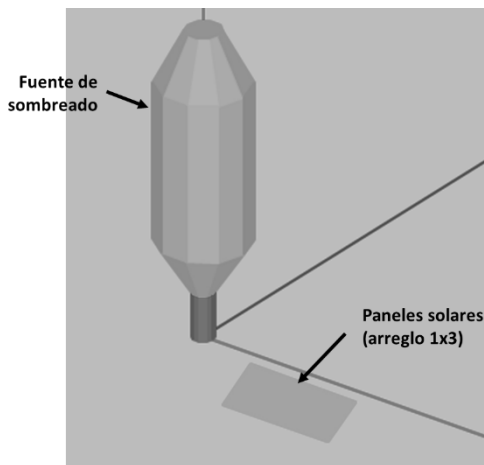


Figura 3. Arreglo de simulación SAM. Fuente: propia

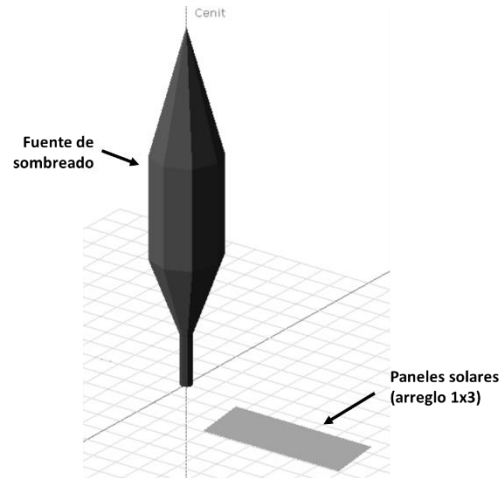


Figura 4. Arreglo para simulación PVSyst. Fuente: propia

Una vez terminada la simulación, PVSyst entrega un archivo en PDF dónde muestra un resumen de los parámetros del proyecto: nombre del proyecto, ubicación geográfica, base de datos meteorológicos, fecha, orientación plano captador, modelos empleados para la simulación, paneles e inversores seleccionados, entre otros. En el informe de simulación se entrega la tabla resumen donde se presentan valores de irradiación, temperatura, sombreado, energía e índice de rendimiento del sistema. Como se muestra en la Figura 5, el informe de simulación de PVSyst entrega un diagrama Sankey en el cual muestra las pérdidas del sistema durante un año y muestra a qué se debe cada una de estas.

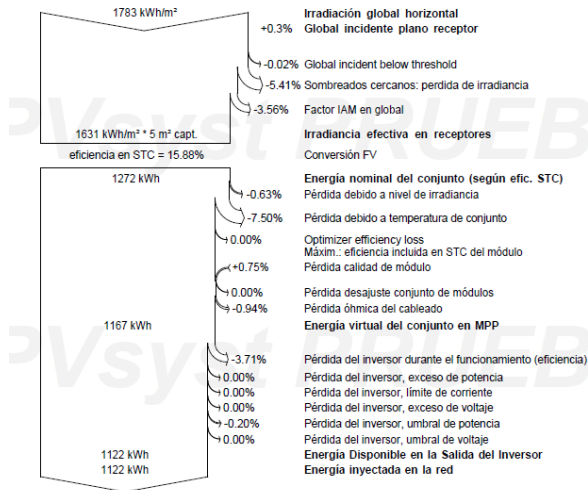


Figura 5. Diagrama Sankey de pérdidas del sistema. Fuente: propia

3.4.4. PV*SOL:

Como se ilustra en la Figura 6, el software cuenta con un entorno 3D y para cargar el horizonte se debe hacer a través de una base de datos meteorológica externa.



Figura 6. Arreglo para simulación PVSyst. Fuente: propia

Previo a la simulación de predicción energética de los sistemas solares fotovoltaicos, PV*SOL requiere que se realice una simulación del sombreado incidente sobre los paneles solares, la cual se hace desde un entorno gráfico 3D y muestra las pérdidas anuales porcentuales sobre los módulos solares ocasionadas por el

sombreado incidente como se ilustra en la Figura 7.

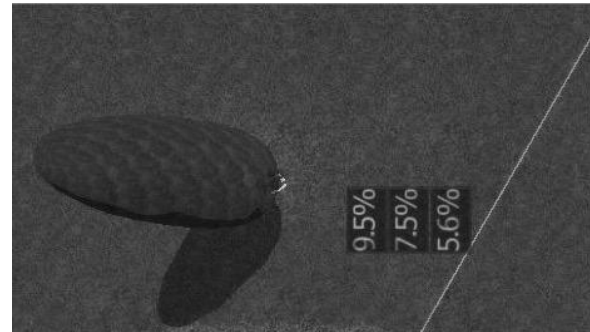


Figura 7. Vista superior del arreglo con las pérdidas anuales porcentuales debidas al sombreado. Fuente: propia

Como se muestra en la Figura 8, el paquete computacional PV*SOL entrega en los resultados de simulación una gráfica que hace referencia a la radiación incidente en el arreglo fotovoltaico. En esta figura se muestra la radiación sobre la horizontal; es decir, la radiación que podría llegar hasta el arreglo sin considerar pérdidas y la radiación sobre la superficie inclinada.

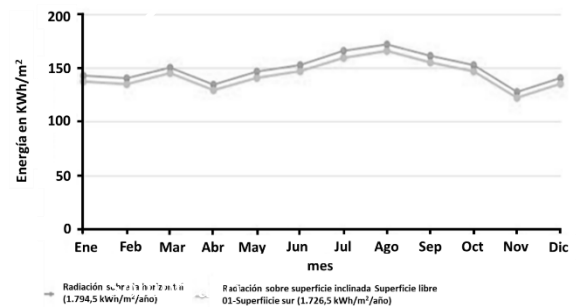


Figura 8. Radiación incidente sobre el arreglo fotovoltaico. Fuente: propia

PV*SOL entrega una hoja de cálculo con los datos de predicción energética, mostrando datos promedio mensuales durante un año y entrega además los datos horarios de cada una de las variables durante el mismo periodo de estudio. Entre las variables suministradas por el software más útiles para diferentes tipos de análisis se encuentran: radiación solar sobre la horizontal

(kWh/m²), radiación difusa sobre la horizontal (kWh/m²), temperatura exterior (°C), radiación sobre la superficie inclinada (kWh/m²), temperatura del módulo (°C), radiación global horizontal (kWh/m²), reflexión del suelo – albedo – (kWh/m²), sombreado (kWh/m²), reflexión en la superficie del módulo (kWh/m²), irradiancia global sobre el módulo (kWh/m²), radiación global horizontal (kWh/m²).

En la simulación del caso de estudio se evaluaron los ítems: interfaz 3D, posibilidad de cargar el horizonte y la frecuencia de resultados, con un peso de 20%, 15% y 20% respectivamente. En la Tabla 5 se muestra la evaluación para cada herramienta.

Teniendo en cuenta los porcentajes de evaluación, en la Tabla 6 se muestra la respectiva ponderación y posterior sumatoria de los puntajes obtenidos por cada software.

3.5. Ponderación Global

En la Tabla 7 se muestra la ponderación y selección del software con mayor puntuación de acuerdo a los criterios de selección.

Como se observa, el software PV*SOL supera a los demás. Con respecto a PVSyst hay una diferencia del 2.7%, con respecto al SAM la diferencia es 14.2% y con respecto a RETScreen la diferencia es 50.9%.

4. Conclusiones

Considerando el creciente desarrollo de sistemas fotovoltaicos en la actualidad y su potencial uso en nuestro país, es importante contar con un panorama sobre las herramientas de cómputo que pueden utilizarse tanto en la academia como en la industria, para el análisis de este tipo de sistemas. Por tanto, en este artículo se presenta

Tabla 5. Cumplimiento ítems de evaluación Simulación

Programa	Interfaz 3D		Posibilidad de cargar el horizonte		Frecuencia de resultados	
	Sí	No	Sí	No	Horario	Mensual
RETScreen Expert		✓		✓		✓
SAM	✓			✓	✓	
PVSyst	✓		✓		✓	
PV*SOL	✓		✓		✓	

Fuente: propia

Tabla 6. Ponderación Simulación

Programa	Porcentaje		
	Interfaz 3D	Posibilidad de cargar el horizonte	Frecuencia de resultados
RETScreen Expert	0	0	10%
SAM	20%	0	20%
PVSyst	20%	15%	20%
PV*SOL	20%	15%	20%

Fuente: propia

Tabla 7. Ponderación y selección de software

Software	Citaciones	Accesibilidad	Amabilidad con el usuario	Simulación	Ponderación total
RETScreen	6.7%	10%	8.3%	10%	35%
SAM	10%	10%	11.7%	40%	71.7%
PVSyst	8.1%	5%	15%	55%	83.1%
PV*SOL	0.9%	5%	25%	55%	85.9%

Fuente: propia

un análisis y evaluación de algunas herramientas para simulación de sistemas fotovoltaicos con el fin de orientar al lector sobre las capacidades de las herramientas. La evaluación se basó en cuatro criterios: número de citas, accesibilidad, amabilidad con el usuario y simulación. En la revisión de la literatura se encontró que el programa de simulación más citado entre los años 2010 y 2020 es el SAM (System Advisor Model), seguido del PVSyst, el RETScreen y el PV*SOL. Sin embargo, con respecto a la interfaz y la amabilidad con el usuario el SAM obtuvo una calificación media. En este orden de ideas, las herramientas PV*SOL y PVSyst mostraron los puntajes más altos en el criterio de amabilidad con el usuario, mientras que RETScreen obtuvo el puntaje más bajo.

Con respecto a la accesibilidad de los programas analizados solo uno de ellos, el SAM, tiene licencia libre sin ninguna restricción. Por otro lado, el RETScreen puede descargarse y usarse libremente, pero con limitaciones. Finalmente, tanto el PVSyst como el PV*SOL no tienen versión libre, ambos paquetes ofrecen versiones de prueba por 30 días. El criterio "Amabilidad con el usuario" juega un papel muy importante ya que la comodidad y la confianza que pueda desarrollar el usuario al interactuar con la herramienta es un factor que repercute en el tiempo que se tarde en implementar los sistemas que desean ser analizados.

La evaluación de este criterio, la cual se realizó a partir de encuestas aplicadas a personas pertenecientes al sector industrial y a la academia, definió que el ambiente del PV*SOL ofrece una mejor experiencia al usuario; los programas SAM y PVSyst tuvieron puntuaciones similares, mientras que RETScreen al no contar con la posibilidad de un entorno gráfico obtuvo la puntuación más baja. Sin duda alguna, el criterio de simulación es uno de los más importantes; características como la interfaz 3D y la posibilidad de cargar el horizonte son esenciales en la precisión del cálculo de la energía generada y las pérdidas que se pueden presentar por fenómenos como el sombreado. Las herramientas SAM, PVSyst y PV*SOL permiten cargar una representación realista del lugar del montaje del sistema y considerar obstáculos que pueden proyectar sombras sobre el arreglo fotovoltaico.

Sin embargo, PVSyst y PV*SOL entregan información relacionada con variables como radiación (difusa, sobre superficie inclinada, global), temperatura, sombreado, rendimiento del sistema, entre otros aspectos que pueden ser de gran ayuda para ingenieros e investigadores. Por esta razón, dichas herramientas obtuvieron los puntajes más altos en el criterio de simulación. Finalmente, a pesar de no tener versión gratuita, lo que puede representar un obstáculo para su uso, el software PV*SOL se puede considerar como la herramienta de simulación más completa

teniendo en cuenta la ponderación global de los resultados de la evaluación de criterios.

5. Referencias

- (1) Bazurto Cubillos A, Zúñiga Balanta J, Echeverry D, Lozano C. Perspectiva del transformador de distribución en redes eléctricas con alta penetración de generación distribuida y vehículos eléctricos. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*. 2016 aug;26(2):35–48.
- (2) International Energy Agency. Renewable capacity highlights; 2021 [citado 28 de octubre de 2021]. Recuperado a partir de: <https://www.irena.org/publications/2021/March/Renewable-Capacity-Statistics-2021>
- (3) Renewables Now. Renewables 2018: Global Status Report [Internet]. Paris: REN21 Secretariat; 2018 [citado 11 de agosto de 2021]. Recuperado a partir de: <https://www.ren21.net/gsr-2018/>
- (4) International Renewable Energy Agency. IEA/IRENA Policies and Measures Database; 2018 [citado 11 de agosto de 2021]. Recuperado a partir de: <https://vipo.iea.org/policiesandmeasures/>
- (5) Congreso de Colombia, “Ley N° 1715 del 13 de mayo de 2014,” *UPME*, no. May, p. 26, 2014. http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/ley_1715_2014.html.
- (6) UPME, “Informe mensual No 2 - Solicitud de certificación de proyectos de FNCE - Incentivos Ley 1715 de 2014,” Bogotá, 2018.
- (7) IDEAM and UPME, “Atlas Interactivo - Radiación IDEAM,” *IDEAM*. p. 1, 2015.
- (8) S. K. Das, D. Verma, S. Nema, and R. K. Nema, “Shading mitigation techniques: State-of-the-art in photovoltaic applications,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 78, no. March, pp. 369–390, 2017, doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.093.
- (9) M. Sidrach-de-Cardona and L. Mora López, “A simple model for sizing stand alone photovoltaic systems,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 55, no. 3, pp. 199–214, 1998. doi.org/10.1016/S0927-0248(98)00093-2.
- (10) Natura Resources Canada. Retscreen; 2021 [citado 11 de agosto de 2021]. Recuperado a partir de: <https://www.nrcan.gc.ca/maps-tools-and-publications/tools/modelling-tools/retscreen/7465>
- (11) University of Wisconsin. A Transient systems simulation; 2021 [citado 11 de agosto de 2021]. Recuperado a partir de: <https://sel.me.wisc.edu/trnsys/>
- (12) Homer Energy. Homer; 2021 [citado 11 de agosto de 2021]. Recuperado a partir de: <https://www.homerenergy.com/products/pro/index.html>
- (13) Insel. Insel 8; 2021 [citado 11 de agosto de 2021]. Recuperado a partir de: <https://www.insel.eu/en/what-is-insel.html>
- (14) F-chart Software. F-chart; 2021 [citado 11 de agosto de 2021]. Recuperado a partir de: <https://fchartsoftware.com/>
- (15) National Renewable Energy Laboratory. Systems advisor model SAM; 2021 [citado 11 de agosto de 2021].

- Recuperado a partir de: <https://sam.nrel.gov/>
- (16) PVsyst Photovoltaic software. PVsyst 7.2; 2021 [citado 11 de agosto de 2021]. Recuperado a partir de: <https://www.pvsyst.com/>
- (17) Solar Desing Tool. Solar Desing Tool; 2021 [citado 11 de agosto de 2021]. Recuperado a partir de: <https://get.solardesigntool.com/features/pv-permit-packages/>
- (18) Energy Systems Research Unit. ESP-r; 2021 [citado 11 de agosto de 2021]. Recuperado a partir de: <http://www.esru.strath.ac.uk/Courseware/ESP-r/tour/>
- (19) Laplace System. Solar Pro; 2021 [citado 11 de agosto de 2021]. Recuperado a partir de: <https://www.lapsys.co.jp/english/products/pro.html>
- (20) Maui Solar Energy Software Corporation. PV DesingPro-G; 2021 [citado 11 de agosto de 2021]. Recuperado a partir de: <http://www.maui-solarsoftware.com/>
- (21) Umar N, Bora B, Banerjee Ch, Panwar B S. Comparison of different PV power simulation softwares: case study on performance analysis of 1 MW grid-connected PV solar power plant. International Journal of Engineering Science Invention (IJESI). 2018 julio;7(7):11-24.
- (22) Gurupira T, Rix A J. PV software comparisons: pvsyst, NREL, SAM and pvlib. En: 25th Southern African Universities Power Engineering Conference (SAUPEC 2017): 30, 31 de Enero y 1 de febrero, Stellenbosch, South Africa; 2017. p. 724-729.
- (23) de Souza Silva J L, Costa T S, de Melo K B, Sakô E Y, Moreira H S, Villalva M G. A Comparative Performance of PV Power Simulation Software with an Installed PV Plant. En: 2020 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT): 26, 27 y 28 febrero, Buenos Aires, Argentina; 2020. p. 531-535.
- (24) Tozzi Jr P, Ho Jo J. A comparative analysis of renewable energy simulation tools: performance simulation model vs system optimization. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017 dic;80(2017):390-398.