



**Determinación del ángulo óptimo de inclinación para  
sistemas fotovoltaicos fijos mediante software de simulación  
PVsyst**

*Determination of the optimal tilt angle for fixed photovoltaic systems using PVsyst  
simulation software*

**Autor:**

Mg. Francisco Ruperto Riccio Anastacio.<sup>1</sup>



0000-0003-1487-1379

<sup>1</sup> Universidad de Guayaquil, Ecuador

[francisco.riccioa@ug.edu.ec](mailto:francisco.riccioa@ug.edu.ec)

**Recepción:** 16 de octubre de 2025

**Aceptación:** 26 de octubre de 2025

**Publicación:** 05 de diciembre de 2025

**Citación/como citar este artículo:** Riccio, F. (2025). Determinación del ángulo óptimo de inclinación para sistemas fotovoltaicos fijos mediante software de simulación PVsyst. Ideas y Voces, 5(3), Pág. 312-325.

## Resumen

El diseño eficiente de sistemas fotovoltaicos (SFV) resulta esencial para garantizar su rentabilidad y desempeño energético a largo plazo. Este estudio emplea el software PVsyst, herramienta líder en simulación fotovoltaica, como apoyo en la optimización del diseño de sistemas fijos. PVsyst permite modelar con precisión la producción de energía considerando factores determinantes como la radiación solar, la orientación e inclinación de los módulos, el sombreado, las pérdidas térmicas y las características eléctricas de los inversores. A través de simulaciones paramétricas, el programa facilita la toma de decisiones informadas que equilibran el rendimiento energético y el costo del sistema. En este trabajo se utilizó PVsyst para determinar el ángulo óptimo de inclinación de un SFV de 100 kW ubicado en Guayaquil, Ecuador, donde la elevada posición solar anual influye directamente en la captación de irradiancia. Se evaluaron inclinaciones entre  $0^{\circ}$  y  $20^{\circ}$ , alcanzándose una producción máxima de 139,40 MWh/año a  $3^{\circ}$ , valor coherente con las condiciones solares ecuatoriales. Sin embargo, esto no aplica en sistemas sin limpieza activa, en estos casos debe considerarse un ángulo mayor para facilitar el escurrimiento del agua de lluvia y la autolimpieza natural del módulo.

**Palabras clave:** PVsyst, sistema fotovoltaico, inclinación óptima, simulación.

## Abstract

The efficient design of photovoltaic systems (PV systems) is essential to ensure their long-term profitability and energy performance. This study employs PVsyst, a leading photovoltaic simulation software, as a key tool to support the optimization of fixed-system designs. PVsyst allows accurate modeling of energy production by considering critical factors such as solar radiation, module orientation and tilt, shading, thermal losses, and the electrical characteristics of inverters. Through parametric simulations, the software facilitates informed decision-making that balances energy yield and system cost. In this work, PVsyst was used to determine the optimal tilt angle for a 100 kW fixed PV system located in Guayaquil, Ecuador, where the high solar altitude throughout the year directly influences irradiance capture. Tilt angles between  $0^{\circ}$  and  $20^{\circ}$  were evaluated, achieving a maximum annual energy output of 139.40 MWh at  $3^{\circ}$ , a value consistent with the solar behavior typical of equatorial regions. However, this configuration may not be suitable for systems without active cleaning mechanisms; in such cases, a greater tilt angle should be considered to facilitate rainwater runoff and the natural self-cleaning of the modules.

**Keywords:** PVsyst, photovoltaic system, optimal tilt angle, simulation.

## Introducción

El acelerado crecimiento de la demanda energética mundial y la preocupación por los efectos del cambio climático han impulsado una transición global hacia fuentes de energía más limpias, sostenibles y renovables. En este contexto, la energía solar fotovoltaica (FV) se ha consolidado como una de las alternativas más prometedoras para la generación eléctrica debido a su disponibilidad, modularidad y reducción progresiva de costos tecnológicos (Islam et al., 2025). A nivel global, la capacidad instalada de sistemas fotovoltaicos ha experimentado un crecimiento exponencial, pasando de menos de 150 GW en 2010 a más de 1 TW en 2022, representando una fracción creciente de la matriz energética mundial (Raji et al., 2025). Este avance refleja no solo la viabilidad técnica y económica de la tecnología solar, sino también el compromiso de los países con políticas orientadas a la descarbonización y la seguridad energética.

El aprovechamiento eficiente de la radiación solar depende, entre otros factores, de la correcta orientación e inclinación de los paneles solares. En los sistemas de estructura fija, la inclinación óptima de los módulos fotovoltaicos es un parámetro crítico que influye directamente en la captación de energía solar y, por ende, en la productividad y rentabilidad del sistema (Belmahdi & El Bouardi, 2020). Diversos estudios han demostrado que una inclinación inadecuada puede ocasionar pérdidas significativas en la generación anual, por lo que determinar el ángulo óptimo de inclinación resulta esencial para maximizar el rendimiento energético (Zhao et al., 2025). Este parámetro está condicionado por la latitud geográfica, las condiciones climáticas locales, la irradiancia global incidente y el diseño estructural de la instalación (Izquierdo-Torres et al., 2019).

La determinación del ángulo óptimo de inclinación requiere herramientas de simulación precisas que permitan modelar el comportamiento energético de los sistemas bajo distintas condiciones de operación. Entre los programas más utilizados destacan PVsyst, PV\*SOL,

SAM y RETScreen, los cuales permiten estimar el rendimiento energético, las pérdidas térmicas, los efectos de sombreado y los balances energéticos de un sistema fotovoltaico (Foronda-Gutiérrez et al., 2022). PVsyst, en particular, se ha posicionado como una de las plataformas más completas para el análisis técnico y energético de sistemas solares, al integrar bases de datos meteorológicas, modelado de componentes eléctricos y simulaciones anuales de rendimiento (Salima et al., 2025). Su aplicación abarca desde proyectos residenciales hasta instalaciones de gran escala, y ha demostrado alta precisión en la estimación de la energía producida frente a datos experimentales (Raji et al., 2025).

La simulación computacional se ha convertido en una herramienta fundamental para la planificación y evaluación de sistemas solares, permitiendo optimizar su diseño sin necesidad de recurrir a ensayos prolongados o costosos en campo (Longares et al., 2023). La comparación entre diferentes softwares de simulación ha evidenciado que PVsyst ofrece ventajas significativas en la modelación de parámetros clave como el ángulo de inclinación, el sombreado y las pérdidas térmicas, mostrando resultados más cercanos a los datos medidos en condiciones reales (Foronda-Gutiérrez et al., 2022; Islam et al., 2025). Asimismo, su uso se ha extendido en estudios aplicados a contextos industriales, urbanos y rurales, demostrando su versatilidad para evaluar la factibilidad técnica y económica de sistemas fotovoltaicos (Dávila et al., 2020; Salmi et al., 2022).

Investigaciones recientes destacan que el rendimiento de un sistema solar depende no solo del ángulo de inclinación, sino también de factores complementarios como el albedo, la temperatura del módulo, la acumulación de polvo y la reflectancia del entorno (Zhao et al., 2025). Estos parámetros, aunque externos al diseño eléctrico, afectan de manera significativa la irradiancia efectiva que incide sobre el panel. En consecuencia, la simulación ofrece la posibilidad de modelar y cuantificar dichos efectos, generando un marco de análisis integral que permite determinar condiciones óptimas de instalación y operación. En zonas con alta

radiación solar, como el norte de África o América Latina, la aplicación de PVsyst ha mostrado resultados consistentes en la predicción de producción energética, contribuyendo a la evaluación del potencial solar (Baqir & Channi, 2021; Wang et al., 2024).

En este sentido, el presente estudio tiene como objetivo determinar el ángulo óptimo de inclinación para sistemas fotovoltaicos fijos mediante la utilización del software de simulación PVsyst. La investigación busca contribuir al conocimiento técnico sobre el diseño de sistemas solares estáticos, optimizando su rendimiento energético y promoviendo su implementación en contextos donde la energía solar representa una alternativa viable frente a las fuentes convencionales. El uso de herramientas computacionales avanzadas permite no solo mejorar la precisión de las estimaciones, sino también fortalecer la planificación energética basada en evidencia técnica y científica. De esta manera, el uso de PVsyst es un recurso confiable para la evaluación, optimización y proyección de sistemas fotovoltaicos orientados hacia la sostenibilidad energética

## **Metodología**

La configuración de un sistema fotovoltaico fijo, particularmente la orientación y el ángulo de inclinación de los paneles, es crucial para maximizar la producción de energía anual. Este rendimiento depende directamente de las condiciones específicas del emplazamiento, tales como la latitud y la irradiación solar disponible. En el caso de este estudio los datos meteorológicos correspondientes a la ciudad de Guayaquil, Ecuador.

El análisis se llevó a cabo mediante el software PVsyst, herramienta especializada en la simulación y evaluación del desempeño energético de sistemas fotovoltaicos conectados a red. Todas las figuras, resultados y datos presentados corresponden exclusivamente a la fase de simulación, sin mediciones experimentales en campo. La investigación se centra, por tanto, en el análisis de los resultados derivados de la modelización computacional.

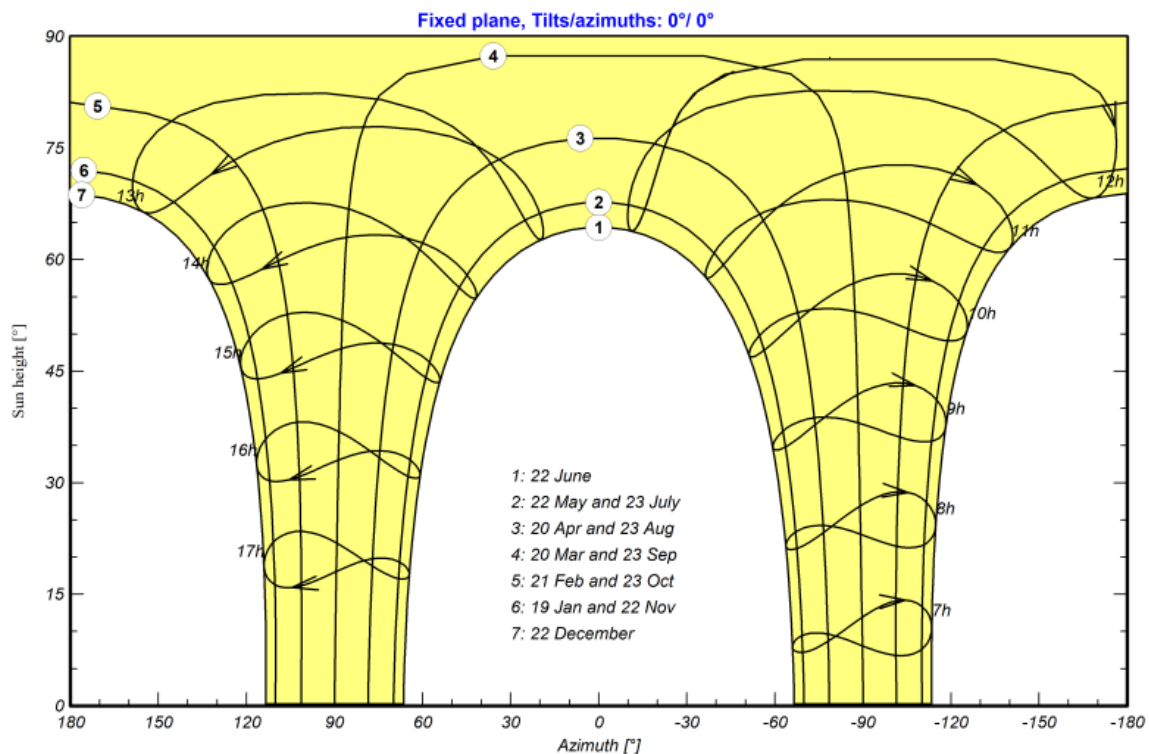
Los datos meteorológicos empleados por PVsyst se obtienen a partir de bases de datos internacionales integradas en el propio software. Al ubicar el proyecto mediante el sistema de cartografía incorporado, la herramienta permite importar automáticamente información climática de fuentes reconocidas como Meteonorm 8.2, NASA-SSE, PVGIS-TMY, NREL/NSRDB TMY, Solcast TMY, Solar Anywhere TGY y Solargis. Además, PVsyst ofrece la posibilidad de incorporar manualmente archivos meteorológicos en otros formatos compatibles. En este estudio se usaron los datos de Meteonorm 8.2 por su disponibilidad y precisión en zonas tropicales, asegurando una adecuada representación de la irradiancia y temperatura de Guayaquil durante todo el año.

### **Parámetros de la simulación**

En ubicaciones cercanas al ecuador, como la ciudad de Guayaquil, la trayectoria del sol permanece relativamente alta sobre el horizonte durante casi todo el año. En estas regiones, el ángulo óptimo de inclinación tiende a ser muy reducido, ya que la radiación solar incide casi perpendicularmente sobre la superficie terrestre, y una inclinación excesiva puede incluso disminuir la captación anual de irradiancia. Según el estudio de Yunus Khan et al., (2020), en ubicaciones ecuatoriales o de baja latitud (entre  $2^\circ$  y  $10^\circ$ ), los ángulos óptimos anuales para módulos fijos suelen encontrarse en el rango de  $0^\circ$  a  $15^\circ$ , debido a la uniformidad de la irradiancia directa y difusa a lo largo del año. Debido a esto, se seleccionó un intervalo de simulación comprendido entre  $0^\circ$  y  $20^\circ$ , con incrementos de  $1^\circ$ , lo que permite identificar con mayor precisión el punto de máxima producción energética bajo condiciones típicas de radiación solar en zonas tropicales.

**Figura 1.**

*Trayectoria solar en el año.*



El análisis de optimización se realiza a través de simulaciones sucesivas, variando únicamente el ángulo de inclinación de acuerdo con los siguientes parámetros mostrados en la tabla 1.

**Tabla 1.**

*Descripción de parámetros principales.*

Parámetro	Valores	Detalle
Orientación (Azimut)	0° (Norte Geográfico)	Siguiendo la recomendación técnica para el hemisferio sur
Ángulo de Inclinación	Variable. Comienza en 0° y se incrementa 1° en cada simulación sucesiva (0°, 1°, 2°, 3°, ...).	Determinación del punto exacto de máxima producción de energía anual.
Métrica de Optimización	Máxima Energía Anual Inyectada a la Red.	Criterio principal para definir el ángulo de inclinación donde la producción es máxima.

## Sistema Fotovoltaico

El sistema fotovoltaico para la simulación corresponde a una instalación conectada a red con una potencia nominal de 100 kW, usando la base de datos meteorológicos que corresponde a las condiciones climáticas tropicales características de Guayaquil, Ecuador (latitud  $-2.19^\circ$  y longitud  $-79.98^\circ$ ). El sistema está conformado por un total de 200 módulos Trina Solar Vertex TSM-500-NEG18R.28-20, de tecnología monocristalina de silicio y un inversor trifásico Huawei SUN2000-100KTL-M2 (480 V AC), con una potencia nominal de salida de 100 kW. Respecto a las pérdidas se usó los datos por defecto del simulador y los cuales fueron los mismos para todas las simulaciones realizadas.

**Tabla 2.**

*Elementos del SFV.*

Elemento	Parámetros	Valor
<b>Módulo FV</b>	Modelo	TSM-500-NEG18R-28-20 Vertex
	Número de módulos	200
	Tecnología del módulo	Si-mono
	Potencia nominal	500 Wp
	Eficiencia módulo ( $25^\circ\text{C}$ )	22.51%
	V <sub>mpp</sub> ( $25^\circ\text{C}$ )	33.2 V
	V <sub>oc</sub> ( $25^\circ\text{C}$ )	40.1 V
<b>Inversor</b>	Modelo	SUN2000-100KTL-M2-480Vac
	Potencia CA nominal	100 kVA
	Eficiencia inversor	98.60%

La Figura 1 muestra la configuración del sistema fotovoltaico en el software PVsyst, donde se definen los parámetros eléctricos y de diseño. En la simulación se estableció un conjunto de 200 módulos Trina Solar TSM-500-NEG18R.28-20 Vertex, dispuestos en 10 cadenas de 20 módulos en serie, para alcanzar una potencia total de 100 kWp. La conversión de energía se realiza mediante un inversor Huawei SUN2000-100KTL-M2 (480 V AC), con una potencia nominal de 100 kW.



**Figura 2.**

*Datos del sistema fotovoltaico usado para las simulaciones.*

**Definición del sistema de red, Variante VC0: "Nueva variante de simulación"**

**Lista de subconjuntos**

Nombre	#Mód #Inv.	#Cadena #MPPT
Generador FV		
Trina solar - TSM-500-NEG18R-...	20	10
Huawei Technologies - SUN2000-...	1	1

**Resumen sistema global**

Núm. de módulos	200
Área del módulo	445 m <sup>2</sup>
Núm. de inversores	1
Potencia FV nominal	100.0 kWp
Potencia de CA nominal	100.0 kWCA
Proporción Pnom	1.000

**Subconjunto: Generador FV**

**Seleccione la orientación:**  
Orientación: Fijo, Incl. 0.0°, Azim. 0.0°

**Ayuda de pre-dimensionamiento**  
☐ Sin dimensionamiento  
☒ Redimens. Potencia planeada: 100.0 kWp  
 o área disponible: 445 m<sup>2</sup>

**Seleccione el módulo FV**  
 Disponible ahora: Filtro: Todos los módulos F  
 Módulos necesarios aprox. 200  
 Trina Solar 500 Wp 28V Si-mono TSM-500-NEG18R-28-20 Verti Desde 2024 Datasheets 2024  
☐ Usar optimizador  
 Dimensiona. voltaje: Vmpp (60°C) 29.8 V  
 Voc (-10°C) 43.3 V

**Seleccione el inversor**  
 Disponible ahora: Voltaje de salida 480 V Tri 50Hz  
 Huawei Technologies 100 kW 200 - 1000 V TL 50/60 Hz SUN2000-100KTL-M2-480Vac Desde 2024  
 Núm. de inversores 1 Voltaje de funcionamiento: 200-1000 V Poder global inversor 100.0 kWca  
☒ Reparto de PNom en el inversor  
☐ Entradas MPPT independientes Voltaje máximo de entrada: 1100 V **inversor con 10 MPPT**  
**Reparto de potencia en este inversor**

**Diseñe el conjunto**  
 Núm. de módulos y cadenas  
 Mód. en serie 20 entre 7 y 25  
 Núm. cadenas 10 entre 10 y 16  
 Pérdida sobrecarga 0.0 %  
 Proporción Pnom 1.00 Dimensionamiento  
 Núm. de módulos 200 Área 445 m<sup>2</sup>

**Condiciones de operación**  
 Vmpp (60°C) 595 V  
 Vmpp (20°C) 675 V  
 Voc (-10°C) 867 V  
 Irradia. plano 1000 W/m<sup>2</sup>  
 Imp (STC) 150 A  
 Isc (STC) 159 A  
 Isc (en STC) 159 A  
☐ Máx. en datos ☒ STC  
 Potencia de funcionamiento máx. 92.8 kW  
 (en 1000 W/m<sup>2</sup> y 50°C)  
**Potencia nom. conjunto (STC) 100.0 kWp**

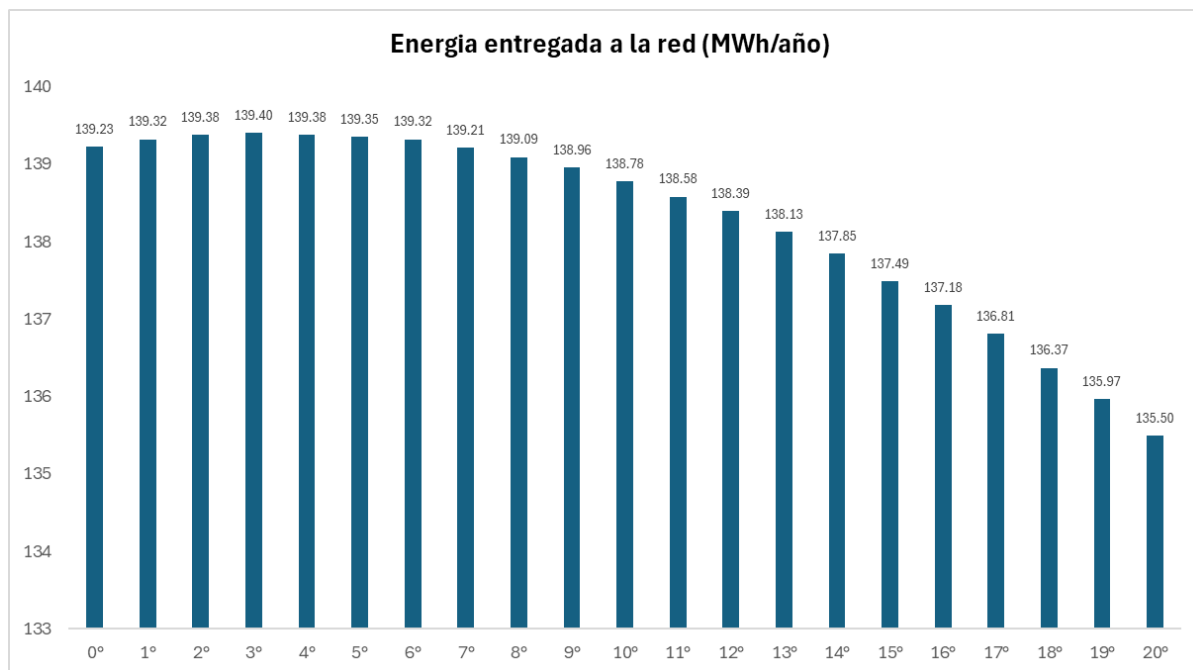
**Resumen del sistema** **Diagrama unifilar** **Cancelar** **OK**

## Resultados

La Figura 3 presenta la variación de la energía anual entregada a la red en función del ángulo de inclinación del generador fotovoltaico, obtenida mediante simulaciones en el software PVsyst para una instalación fija de 100 kW ubicada en Guayaquil, Ecuador. Los resultados muestran que la producción energética se mantiene prácticamente constante para inclinaciones entre 0° y 5°, alcanzando su valor máximo a 3°, con una generación anual de 139,40 MWh/año. A partir de este punto, la energía entregada disminuye progresivamente con el incremento del ángulo, registrando una producción mínima de 135,50 MWh/año a 20°.

**Figura 3.**

*Energía anual entregada a la red en función del ángulo de inclinación del sistema fotovoltaico simulado en PVsyst.*



## Discusión

Los resultados de la simulación con PVsyst mostraron que la producción máxima de energía para el sistema fotovoltaico fijo de 100 kW ubicado en Guayaquil, Ecuador, se alcanza con una inclinación de 3°, entregando 139,40 MWh/año a la red. Este valor confirma que, en ubicaciones próximas al ecuador, donde la trayectoria solar presenta una alta elevación durante la mayor parte del año, los ángulos de inclinación reducidos permiten aprovechar de manera más uniforme la irradiancia global anual (Yunus Khan et al., 2020). Sin embargo, aunque esta inclinación maximiza la captación energética, no necesariamente representa la configuración más adecuada para el mantenimiento del sistema a largo plazo.

En sistemas fotovoltaicos fijos sin mecanismos de limpieza activa, la acumulación de polvo y suciedad constituye uno de los principales factores que deterioran la eficiencia de los módulos. Según (Zafar et al., 2025), la acumulación de polvo puede reducir la potencia generada hasta en un 30 % en condiciones áridas o tropicales si no se realizan tareas periódicas de limpieza.

De igual manera, Sepúlveda-Oviedo (2025) destaca que los sistemas sin mantenimiento automatizado deben incorporar métodos naturales de mitigación, siendo el ajuste del ángulo de inclinación uno de los medios más efectivos para facilitar el escurrimiento del agua de lluvia y el desprendimiento de partículas superficiales.

Los estudios de Alzahrani et al. (2025) en entornos desérticos demostraron que los módulos con baja inclinación ( $0^{\circ}$ – $5^{\circ}$ ) retienen con mayor facilidad el polvo y el agua, reduciendo la transmisión óptica del vidrio y aumentando las pérdidas de potencia. En cambio, inclinaciones superiores a  $10^{\circ}$  favorecen la autolimpieza natural y reducen significativamente las pérdidas acumuladas, especialmente cuando las precipitaciones son frecuentes.

Por tanto, aunque el ángulo óptimo energético determinado en este estudio sea de  $3^{\circ}$ , los resultados sugieren que, en ausencia de un sistema de limpieza automatizado, debe considerarse un ángulo mayor (entre  $10^{\circ}$  y  $15^{\circ}$ ) como valor de diseño técnico recomendado. Esta elección representa un compromiso entre eficiencia energética y mantenimiento operativo, permitiendo una autolimpieza natural más efectiva, reduciendo la frecuencia de mantenimiento manual y asegurando una mayor estabilidad del rendimiento a lo largo del tiempo. Esta estrategia coincide con las recomendaciones de Sepúlveda-Oviedo (2025)S, quien sostiene que los ajustes estructurales en la inclinación son una medida sostenible y de bajo costo para mejorar el desempeño de los SFV.

## Conclusiones

El presente estudio determinó, mediante simulaciones en PVsyst, que el ángulo óptimo de inclinación energética para un sistema fotovoltaico fijo de 100 kW en Guayaquil, Ecuador, es alrededor de  $3^{\circ}$ , lo que maximiza la energía anual entregada a la red. No obstante, el análisis complementario y la evidencia científica indican que en sistemas sin limpieza activa debe priorizarse una inclinación ligeramente mayor ( $10^{\circ}$ – $15^{\circ}$ ), que permita facilitar el escurrimiento

del agua de lluvia y la autolimpieza natural del módulo. Esta configuración equilibra el aprovechamiento energético con la sostenibilidad operativa del sistema.

En consecuencia, se propone que la inclinación de diseño para sistemas fotovoltaicos fijos en regiones tropicales sin mantenimiento automatizado sea de al menos  $10^\circ$ , garantizando tanto la eficiencia energética anual como la mitigación pasiva del ensuciamiento. Este ajuste contribuye a que la producción de energía no sea afectada de manera significativa, a reducir los costos de mantenimiento y mejorar la confiabilidad general de la instalación.

## Bibliografía

- Alzahrani, M., Rahman, T., Rawa, M., & Weddell, A. (2025). Impact of dust and tilt angle on the photovoltaic performance in a desert environment. *Solar Energy*, 288. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2025.113239>
- Baqir, M., & Channi, H. K. (2021). Analysis and design of solar PV system using Pvsyst software. *Materials Today: Proceedings*, 48, 1332–1338. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.029>
- Belmahdi, B., & El Bouardi, A. (2020). Solar potential assessment using PVsyst software in the northern zone of Morocco. *Procedia Manufacturing*, 46, 738–745. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.03.104>
- Dávila, R. N., Vallejo, D. A., Soria, R., & Ordoñez, F. (2020). *Evaluación del potencial técnico y económico de la tecnología solar fotovoltaica para micro generación eléctrica en el sector residencial del Distrito Metropolitano de Quito*. 17, 80–91.
- Foronda-Gutiérrez, L. A., Trejos-Grisales, L. A., & González-Montoya, D. (2022). Evaluación de herramientas computacionales para análisis de sistemas fotovoltaicos. *Ingeniería y Competitividad*, 24. <https://doi.org/10.25100/iyc.v24i2.11516>
- Islam, M. A., Ali, M. M. N., Benitez, I. B., Sidi Habib, S., Jamal, T., Flah, A., Blazek, V., & El-Bayeh, C. Z. (2025). A comprehensive evaluation of photovoltaic simulation software: A decision-making approach using Analytic Hierarchy Process and performance analysis. *Energy Strategy Reviews*, 58. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2025.101663>
- Izquierdo-Torres, I. F., Pacheco-Portilla, M. G., González-Morales, L. G., & Zalamea-León, E. F. (2019). Photovoltaic simulation considering building integration parameters. *Ingenius*, 2019(21), 21–31. <https://doi.org/10.17163/ings.n21.2019.02>
- Longares, J. M., García-Jiménez, A., & García-Polanco, N. (2023). Multiphysics simulation of bifacial photovoltaic modules and software comparison. *Solar Energy*, 257, 155–163. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.04.005>
- Raji, L., Razak, A. A., & Sharol, A. F. (2025). Comparative assessment of PV simulation tools for a megawatt-scale rooftop solar photovoltaic system in tropical climate. *Next Energy*, 9. <https://doi.org/10.1016/j.nxener.2025.100452>
- Salima, B., Ibrahim, A., Jamal, M., Ilham, A., & Younes, A. (2025). Sizing and simulation of a photovoltaic installation at the Al-Hoceima desalination plant. *Desalination and Water Treatment*, 322. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2025.101171>

- Salmi, M., Baci, A. B., Inc, M., Menni, Y., Lorenzini, G., & Al-Douri, Y. (2022). Desing and simulation of an autonomous 12.6 kW solar plant in the Algeria's M'sila region using PVsyst software. *Optik*, 262. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2022.169294>
- Sepúlveda-Oviedo, E. H. (2025). Optimizing PV maintenance: Methods, cleaning frequency, and a selection protocol. In *Energy Reports* (Vol. 14, pp. 1578–1605). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2025.07.008>
- Wang, F., Li, R., Zhao, G., Xia, D., & Wang, W. (2024). Simulation test of 50 MW grid-connected “Photovoltaic+Energy storage” system based on pvsyst software. *Results in Engineering*, 22. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102331>
- Yunus Khan, T. M., Soudagar, M. E. M., Kanchan, M., Afzal, A., Banapurmath, N. R., Akram, N., Mane, S. D., & Shahapurkar, K. (2020). Optimum location and influence of tilt angle on performance of solar PV panels. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 141(1), 511–532. <https://doi.org/10.1007/s10973-019-09089-5>
- Zafar, L., Abbasi, M. S., Rao, A., Shehryar, & Anwar, A. (2025). Evaluating and mitigating the effects of dust accumulation on photovoltaic panel performance. *Results in Engineering*, 28. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.107672>
- Zhao, W., Han, Z., Wu, Y., & Lu, H. (2025). Numerical simulation of dust deposition influences on building integrated photovoltaic array. *Renewable Energy*, 250. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.123334>