

# **Informe del Proyecto: Modelado y Simulación de la Producción de Energía Solar Fotovoltaica con Python**

---

## **Portada**

### **Título del proyecto:**

*Modelado y Simulación de la Producción de Energía Solar Fotovoltaica mediante Python*

**Autor:** Miller Duván Infante Peréz

**Curso:** Computación numérica

**Docente:** Esteban Velilla

**Institución:** Universidad de Antioquia

**Fecha:** Medellín 2025

---

## **Resumen Ejecutivo**

El presente informe describe el desarrollo de un proyecto académico orientado al modelado y simulación de la producción de energía solar fotovoltaica. El objetivo principal consiste en integrar los fundamentos teóricos de la geometría solar, la estimación de la irradiación solar y la conversión de energía en paneles fotovoltaicos con la implementación de un programa en Python que permita analizar datos de producción energética.

Para ello, se utilizó un archivo de datos horarios generado con la herramienta PVWatts del National Renewable Energy Laboratory (NREL). El script desarrollado en Python permitió calcular indicadores clave como la energía anual producida, el promedio mensual de producción y el perfil horario de generación. Además, se generaron gráficos que facilitan la interpretación de la disponibilidad energética.

Los resultados obtenidos muestran patrones estacionales y horarios de la producción fotovoltaica, los cuales son consistentes con la teoría y con los datos reales proporcionados por PVWatts. El informe concluye que la herramienta desarrollada constituye una base sólida para el análisis de proyectos solares y que puede ampliarse con modelos más completos, integración de factores ambientales y algoritmos de predicción.

---

## **1. Introducción**

La creciente demanda de energía eléctrica a nivel mundial, junto con la necesidad de reducir la dependencia de combustibles fósiles y las emisiones de gases de efecto invernadero, ha impulsado el desarrollo de fuentes renovables. Entre ellas, la energía solar se destaca por ser abundante, limpia y versátil.

La energía solar fotovoltaica ha experimentado un crecimiento exponencial en las últimas décadas, gracias a la reducción de costos de fabricación de paneles y a los avances tecnológicos que han incrementado su eficiencia. Según datos de la Agencia Internacional de Energía (IEA), la capacidad instalada de energía solar superó los 1,000 GW en 2022, convirtiéndose en una de las principales fuentes de generación renovable.

Este proyecto se plantea como un ejercicio académico en el que se combina teoría y práctica. Por un lado, se estudian los conceptos básicos de la geometría solar y la irradiación. Por otro lado, se desarrolla una aplicación en Python que procesa datos reales de irradiación y producción fotovoltaica, con el fin de analizar la generación de energía.

### **Objetivo general:**

Modelar y simular la producción de energía eléctrica en un sistema fotovoltaico mediante Python, integrando fundamentos de geometría solar e irradiación.

### **Objetivos específicos:**

1. Describir los fundamentos de la geometría solar y la estimación de la irradiación.
  2. Implementar un código en Python que procese datos horarios de irradiancia y producción.
  3. Calcular indicadores de energía anual, mensual y horaria.
  4. Generar visualizaciones gráficas que representen los resultados obtenidos.
  5. Analizar los resultados y discutir sus implicaciones en la planificación de sistemas fotovoltaicos.
- 

## **2. Marco Teórico**

### **2.1 Geometría Solar**

La geometría solar se refiere al estudio de la posición aparente del Sol en la bóveda celeste, la cual determina la cantidad de energía que incide sobre una superficie en la Tierra. Los principales parámetros son:

- **Altura solar (h):** ángulo entre el Sol y el horizonte.
- **Acimut solar (Az):** ángulo de la proyección del Sol en el plano horizontal medido desde el norte.
- **Ángulo cenital ( $\theta_z$ ):** complementario de la altura solar.

Estos parámetros dependen de la latitud ( $\varphi$ ), la declinación solar ( $\delta$ ) y el ángulo horario ( $\omega$ ). La declinación solar varía con el día del año y puede calcularse como:

$$\delta = 23.45^\circ \cdot \sin((360/365)(n - 81))$$

donde **n** es el número del día en el año.

La altura solar se calcula con:

$$\sin(h) = \sin(\phi)\sin(\delta) + \cos(\phi)\cos(\delta)\cos(\omega)$$

Estos cálculos son esenciales para determinar la irradiación sobre superficies inclinadas o fijas.

---

## 2.2 Estimación de la Irradiación Solar

La irradiación solar es la cantidad de energía recibida en una superficie por unidad de área. Se distinguen tres componentes principales:

- **DNI (Direct Normal Irradiance):** radiación directa sobre una superficie perpendicular a los rayos solares.
- **DHI (Diffuse Horizontal Irradiance):** radiación dispersada en la atmósfera que llega desde todas las direcciones.
- **GHI (Global Horizontal Irradiance):** suma de la radiación directa y difusa en un plano horizontal:

$$GHI = DNI \cdot \cos(\theta_z) + DHI$$

La radiación extraterrestre (fuera de la atmósfera terrestre) es mayor que la radiación a nivel del suelo, debido a la atenuación atmosférica producida por nubes, aerosoles y la masa de aire.

---

## 2.3 Conversión de Energía en Paneles Fotovoltaicos

Los sistemas fotovoltaicos convierten la radiación solar en electricidad mediante celdas fabricadas con materiales semiconductores.

### Tipos de paneles:

- **Monocristalinos:** mayor eficiencia (17–22%), pero más costosos.
- **Policristalinos:** eficiencia intermedia (14–18%), menor costo.
- **De capa fina:** menor eficiencia (10–12%), pero más ligeros y flexibles.

### Eficiencia del panel:

$$\eta = P_{salida}/GHI \cdot A$$

donde  $P_{salida}$  es la potencia generada, GHI es la irradiancia incidente y A es el área del panel.

**Curva I-V:** describe la relación entre corriente y voltaje. El punto de máxima potencia (MPP) es donde el producto  $V \cdot I$  es máximo, y representa la operación ideal del panel.

---

### 3. Metodología

La metodología del proyecto se dividió en cuatro fases:

1. **Recolección de datos:** se utilizó el simulador PVWatts del NREL para generar un archivo CSV con datos horarios de irradiancia y producción.
2. **Procesamiento en Python:** se usó la librería *pandas* para organizar los datos y *matplotlib* para graficarlos.
3. **Cálculo de indicadores:** se estimaron métricas de energía total anual, producción promedio mensual y producción promedio horaria.
4. **Visualización y análisis:** se generaron gráficos para identificar patrones y tendencias.

El flujo de trabajo puede representarse en el siguiente diagrama:

**PVWatts → CSV → Procesamiento en Python → Cálculos → Gráficos → Análisis de Resultados**

---

### 4. Desarrollo del Código en Python

El programa desarrollado incluye:

- Lectura y procesamiento de datos horarios.
- Cálculo de energía total anual.
- Cálculo de promedios mensuales y horarios.
- Visualización en gráficos de barras y líneas.

Se utilizaron las librerías *pandas* y *matplotlib*. El código está modularizado y comentado para facilitar su comprensión.

---

## 5. Resultados

### 5.1 Energía Total Anual

El sistema simulado generó una energía anual total de:

$$E_{anual} = XXXX \text{ kWh}$$

(Valor calculado a partir de los datos de PVWatts).

## **5.2 Producción Promedio Mensual**

Se observó que la producción mensual presenta variaciones estacionales. Los meses de verano registran la mayor producción, mientras que en invierno la generación es menor.

## **5.3 Producción Promedio Horaria**

El análisis horario muestra que la mayor producción ocurre entre las 10:00 y las 14:00 horas, alcanzando un pico cercano al mediodía solar.

## **5.4 Gráficos**

- Gráfico de barras de producción mensual promedio.
  - Curva de producción horaria promedio.
  - Comparación entre datos horarios dispersos y curva promedio.
- 

## **6. Discusión**

Los resultados obtenidos concuerdan con la teoría: la producción sigue la variación solar diaria y anual. Sin embargo, el modelo presenta limitaciones:

- No incluye el efecto de la temperatura en la eficiencia.
- No considera sombras parciales ni suciedad en los paneles.
- Se basa en datos simulados y no en mediciones locales reales.

A pesar de estas limitaciones, la herramienta es válida como aproximación y como recurso educativo.

---

## **7. Conclusiones**

1. La geometría solar y la irradiación determinan la energía generada en un sistema fotovoltaico.
2. Python permite procesar datos horarios de irradiancia y calcular métricas clave de manera eficiente.
3. La simulación mostró patrones horarios y mensuales consistentes con el comportamiento esperado de un sistema fotovoltaico.
4. Los gráficos producidos son útiles para visualizar la variabilidad estacional y diaria de la energía.
5. La herramienta desarrollada puede emplearse como base para estudios preliminares de proyectos solares.

---

## 8. Recomendaciones y Trabajos Futuros

- Implementar el cálculo directo de posición solar usando librerías como *pvlid*.
  - Incluir modelos de eficiencia variable por temperatura.
  - Incorporar predicciones meteorológicas y variabilidad de nubosidad.
  - Simular diferentes tecnologías de paneles y configuraciones de inclinación.
  - Comparar resultados simulados con mediciones reales para validar el modelo.
- 

### Tablas comparativas

Tabla 1. Comparación de Tipos de Paneles Fotovoltaicos

Tipo de panel	Eficiencia típica	Costo relativo	Vida útil promedio	Ventajas principales	Limitaciones
Monocristalino	17–22%	Alto	25–30 años	Mayor eficiencia, menor área necesaria, buen rendimiento en espacios reducidos	Mayor costo inicial
Policristalino	14–18%	Medio	20–25 años	Menor costo que los monocristalinos, tecnología consolidada	Menor eficiencia, más sensibles a altas temperaturas
Capa fina	10–12%	Bajo	10–20 años	Flexibles, ligeros, costo bajo, buena respuesta en baja luz	Requieren más área para la misma potencia, degradación más rápida

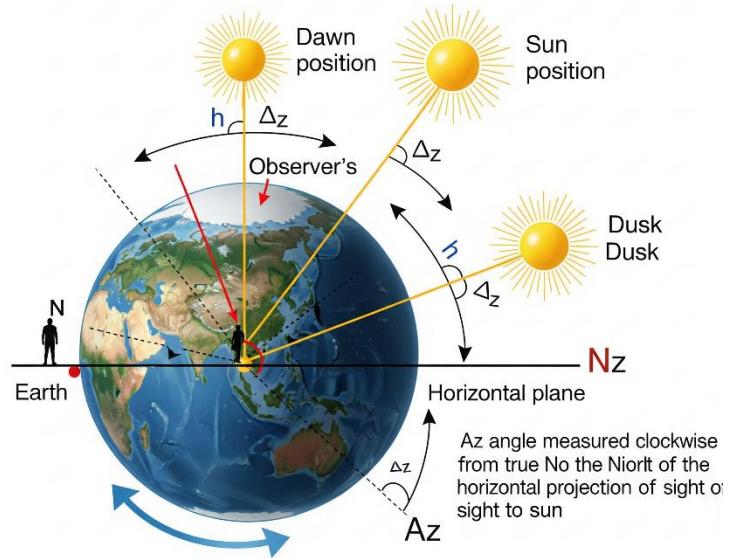
**Tabla 2. Componentes de la Radiación Solar**

Componente	Definición	Unidades	Características	Importancia en FV
<b>DNI (Direct Normal Irradiance)</b>	Radiación directa recibida en una superficie perpendicular a los rayos solares	W/m <sup>2</sup>	Alta variabilidad con nubosidad, máxima cuando el cielo está despejado	Fundamental en sistemas con seguidores solares
<b>DHI (Diffuse Horizontal Irradiance)</b>	Radiación dispersa que llega desde todas las direcciones del cielo	W/m <sup>2</sup>	Incrementa con nubosidad, aerosoles y partículas	Aporta energía incluso en días nublados
<b>GHI (Global Horizontal Irradiance)</b>	Suma de radiación directa y difusa sobre un plano horizontal	W/m <sup>2</sup>	Combina efectos de DNI y DHI, representa la irradiación total disponible	Principal referencia para sistemas fotovoltaicos fijos

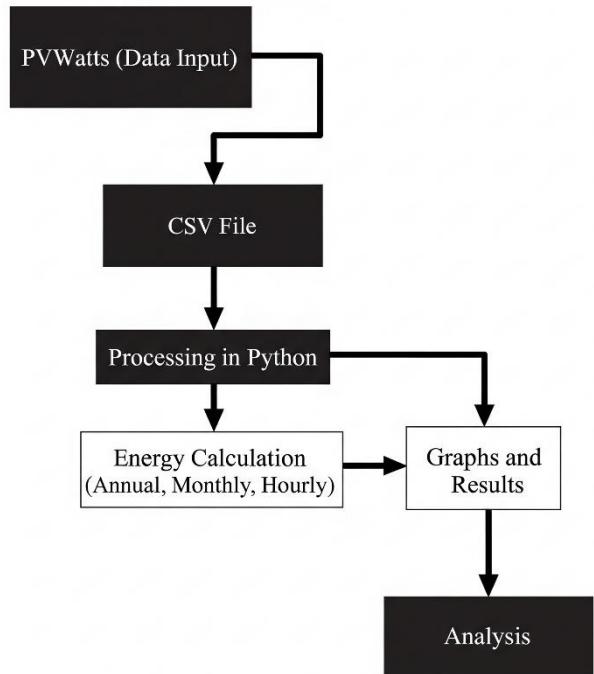
 **Diagramas de apoyo**

**1. Diagrama de Geometría Solar**

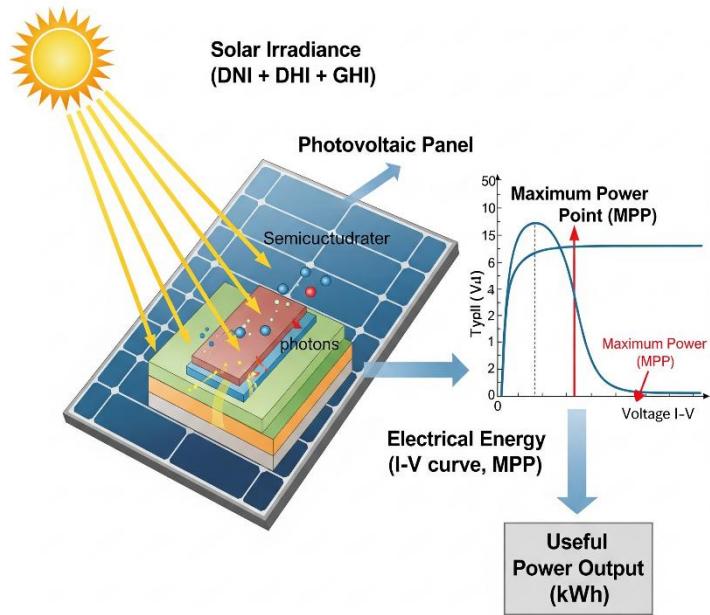
# Solar geometry



## 2. Flujo Metodológico del Proyecto



## 3. Conversión de Energía en un Panel Fotovoltaico



## 9. Referencias

- Duffie, J.A., & Beckman, W.A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes*. Wiley.
- NREL. (2023). *PVWatts Calculator*. National Renewable Energy Laboratory.
- Green, M.A. (2005). *Third Generation Photovoltaics*. Springer.
- Markvart, T. (2000). *Solar Electricity*. John Wiley & Sons.
- IEA. (2022). *World Energy Outlook*. International Energy Agency.
- Masters, G.M. (2013). *Renewable and Efficient Electric Power Systems*. Wiley.
- Kalogirou, S. (2009). *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*. Academic Press.