

Efecto de los factores ambientales en la eficiencia de arreglos de paneles solares fotovoltaicos

Trabajo de grado para optar al título de
Magister en Ingeniería Mecánica

Autor:

Ing. Fabián A. García Barrios

Tutor:

Ing. Jonathan Fábregas Villegas, MSc

Barranquilla, 5 de febrero de 2018



Trabajo de grado Modalidad de profundización (TGP)

Opción de grado: Artículo presentado y constancia de recibido, para publicar en un revista del área de conocimiento del trabajo y que esté indexada en una base de datos.

(DECRETO RECTORAL N° 0016 02 de mayo de 2016)

Revista: International Journal of Chemtech Research

Número: Vol. 11 No. 1

Año: 2018

ISSN: 0974-4290

Información adicional:

ISSN(Online): 2455-9555

[Enlace al artículo](#)

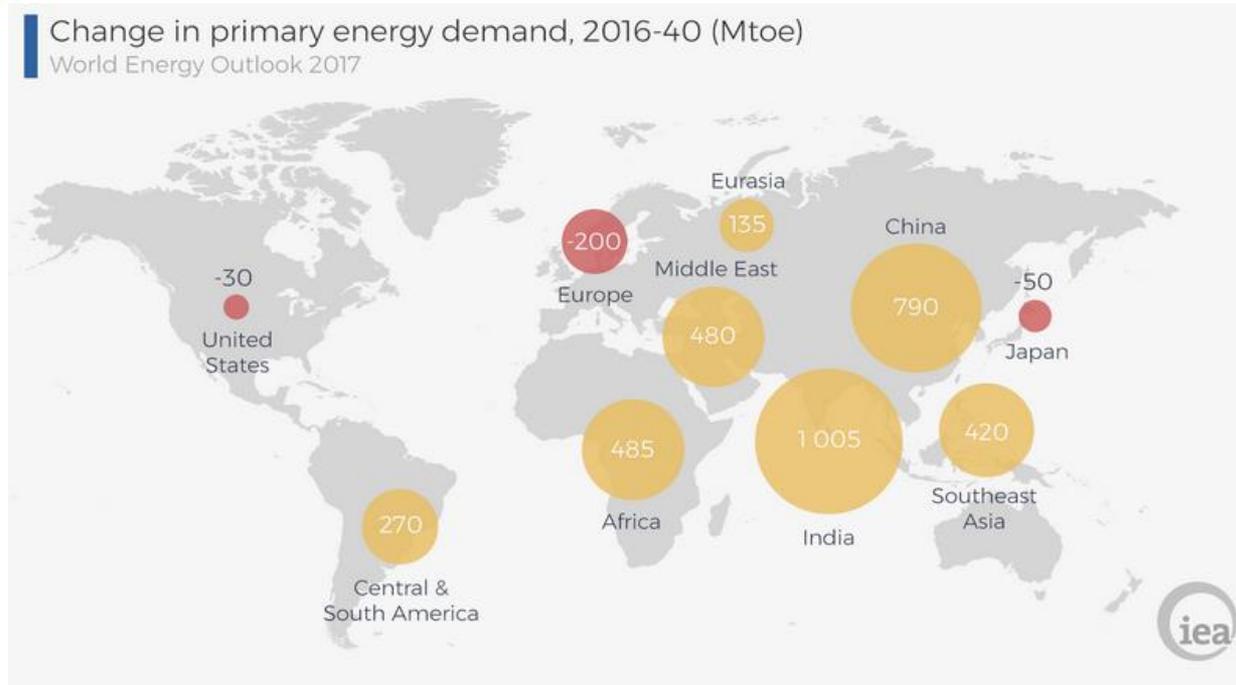




Contenido

1. Introducción
2. Planteamiento del problema
3. Justificación
4. Hipótesis
5. Objetivos
6. Fundamentación teórica
7. Metodología
8. Diseño de experimento
9. Planta de pruebas
10. Modelos matemático
11. Resultados
12. Conclusiones
13. Recomendaciones
14. Bibliografía

Introducción

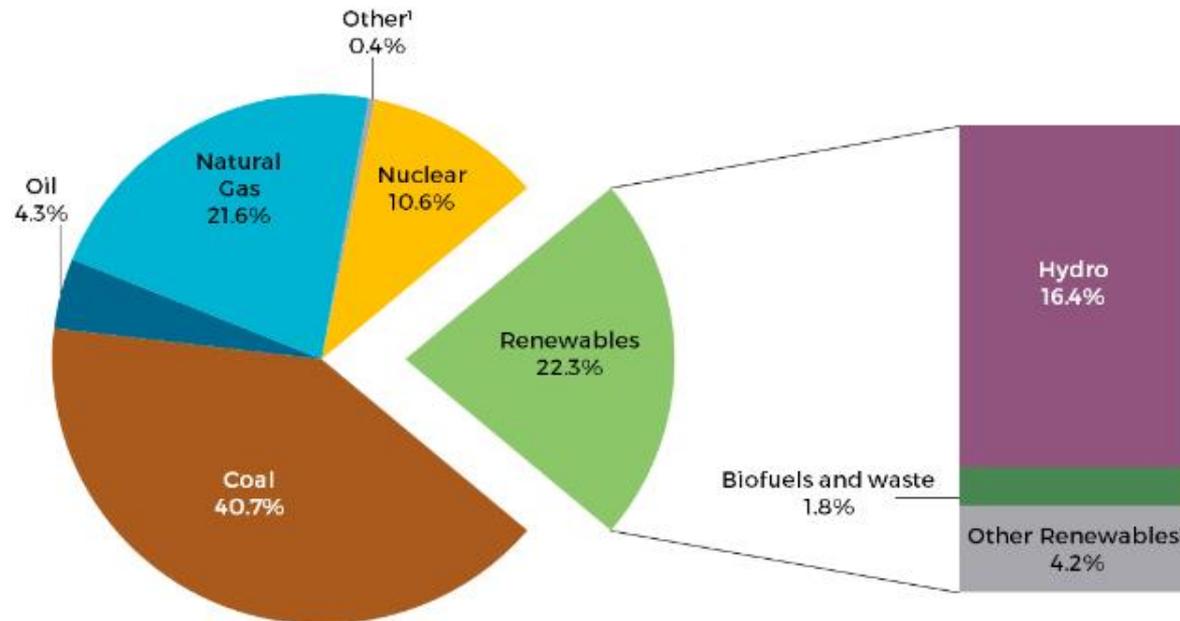


Tomado de sitio web de la International Energy Agency [1]

Se estima que entre 2016 y 2040, la población mundial se incremente 21,6 % (de 7,4 billones a 9 billones de personas). Se espera que el consumo de energía se incremente en 30 %, teniendo en cuenta el crecimiento poblacional y económico global. [1]

Introducción

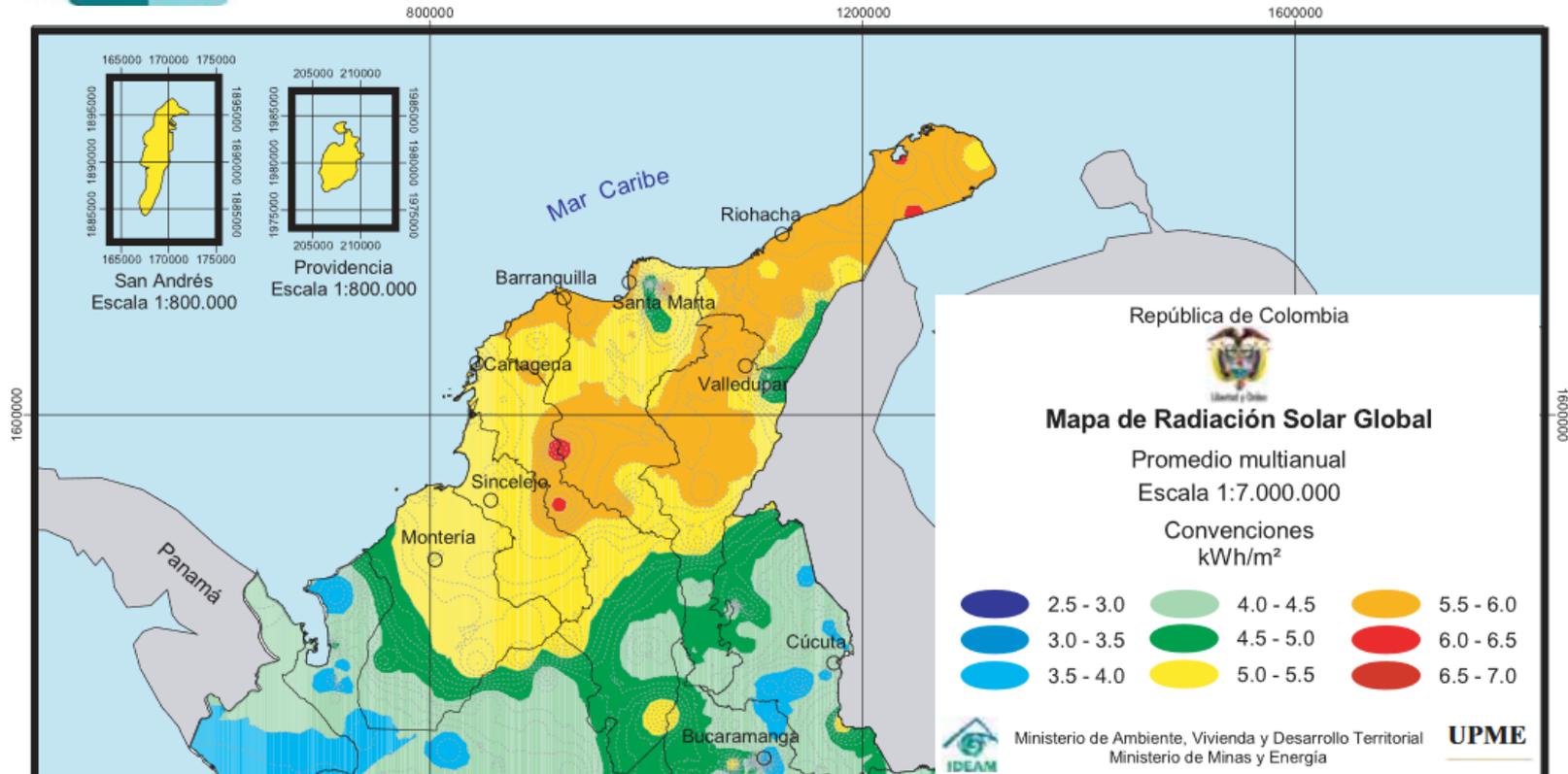
Figure 4: Fuel shares in world electricity production in 2014



Tomado de sitio web de la International Energy Agency [2]

En la actualidad, las fuentes de energía renovables tienen sólo el 22,3 % del mercado global de energía. La fuente de energía renovable con mayor crecimiento en las últimas 2 décadas es la solar PV con 44,2 %.

Introducción



La ciudad de Barranquilla es propicia para la implementación de sistema de generación de energía eléctrica con paneles solares PV. Ya que recibe altos niveles de radiación solar [3] y cuenta con grandes consumidores de energía eléctrica a nivel industrial, comercial y residencial.

Introducción

Variables climáticas

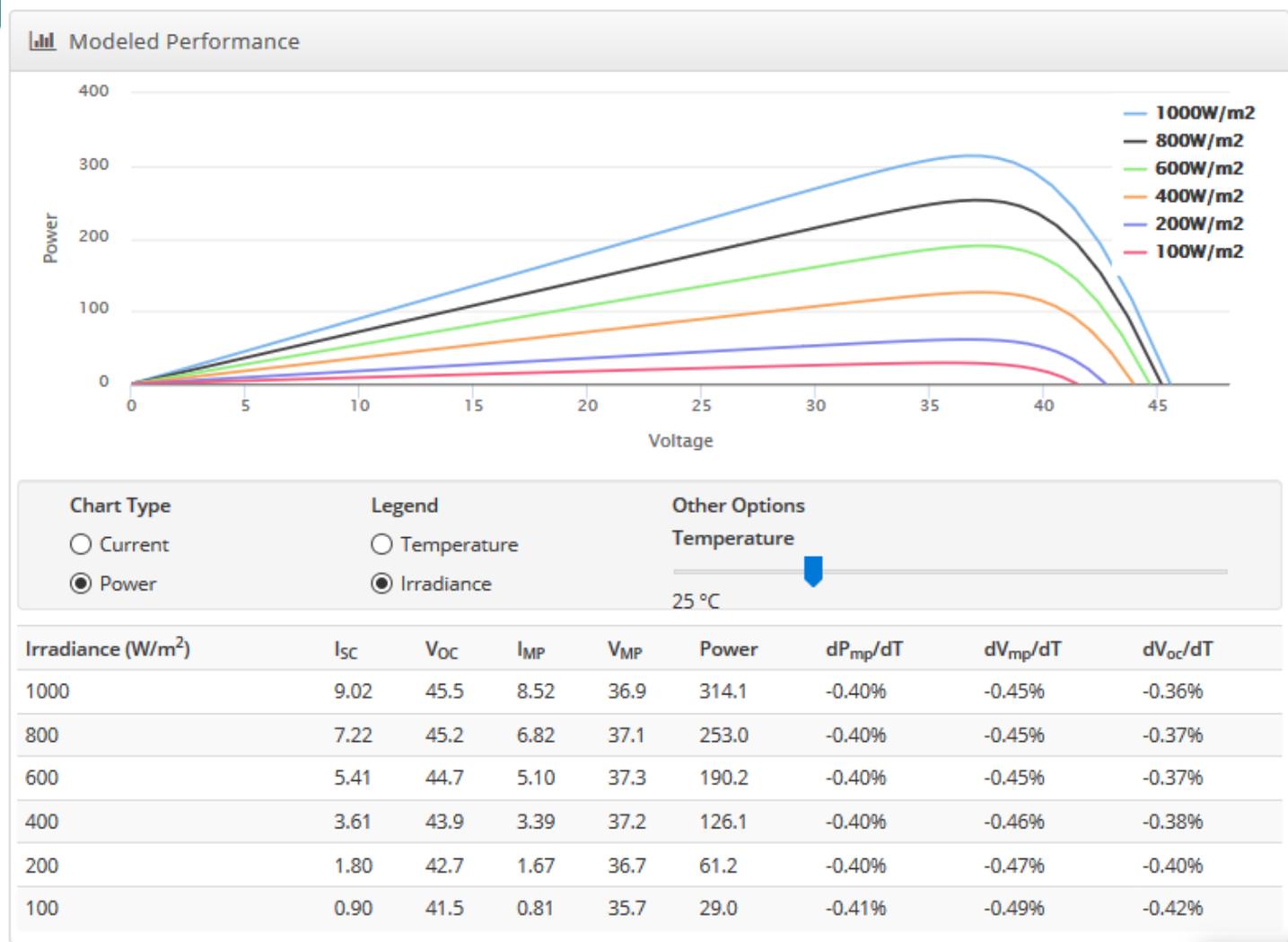
- Temperatura ambiente
- Humedad relativa
- Velocidad y dirección del viento
- Presión barométrica
- Rata de precipitaciones
- Radiación solar

Variables ambientales

- Contaminación
- Polución
- Soiling

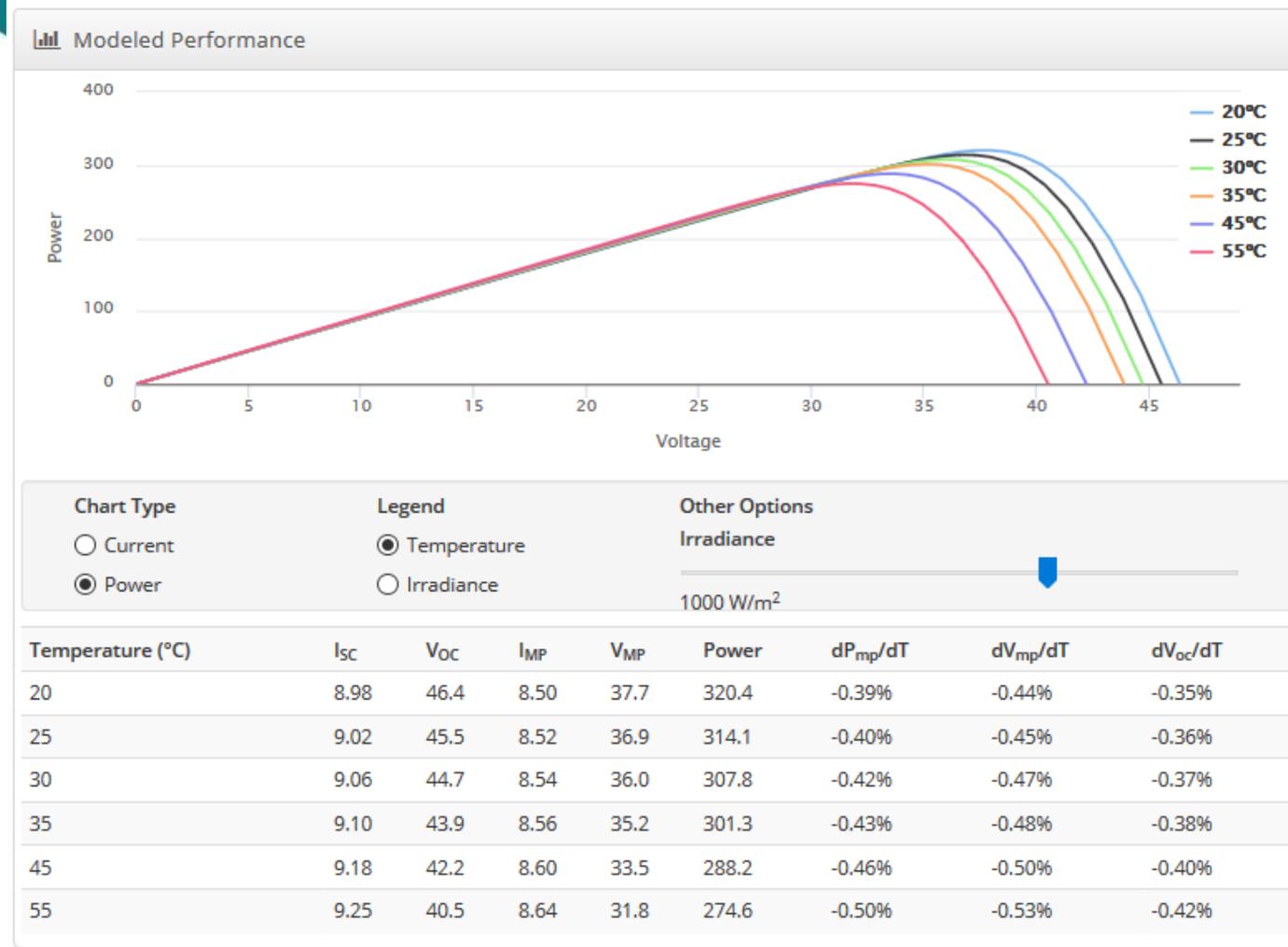


Planteamiento del Problema



Tomado de sitio web de la aplicación Helioscope [4]

Planteamiento del Problema



Tomado de sitio web de la aplicación Helioscope [4]



Justificación

- Esquemas de negocio: EPC y PPA.
- Altos tiempos de retorno (10 a 20 años).
- Reducción de costos de O&M.
- Garantizar la generación de energía.
- Identificación y mitigación de factores que afectan la eficiencia del sistema.



Hipótesis

Establecer un modelo matemático que represente el comportamiento de un arreglo de paneles solares fotovoltaicos teniendo en cuenta la variedad climática de la localización del arreglo.

Este modelo permitirá estimar el nivel de suciedad presente en el panel a través de la desviación que presente la eficiencia real con respecto a la eficiencia calculada.



Objetivos

General

Evaluar el efecto que tienen los factores climáticos y el ensuciamiento en la eficiencia de un arreglo de paneles solares PV, ubicado en la ciudad de Barranquilla. Con el objeto de establecer políticas de limpieza basadas en la eficiencia del sistema.

Específicos

1. Obtener modelo matemático para la curva I-V de los paneles solares PV.
2. Estimar la temperatura de los paneles solares PV a partir de factores meteorológicos.
3. Calcular la eficiencia global de los arreglos de paneles solares PV teniendo en cuenta la variabilidad climática.
4. Estimar por diferencias el efecto que tiene el ensuciamiento sobre la eficiencia de los arreglos de paneles solares PV.
5. Identificar los criterios que deben ser tenidos en cuenta la elaboración de las políticas de limpieza.

Marco teórico

Efecto fotoeléctrico

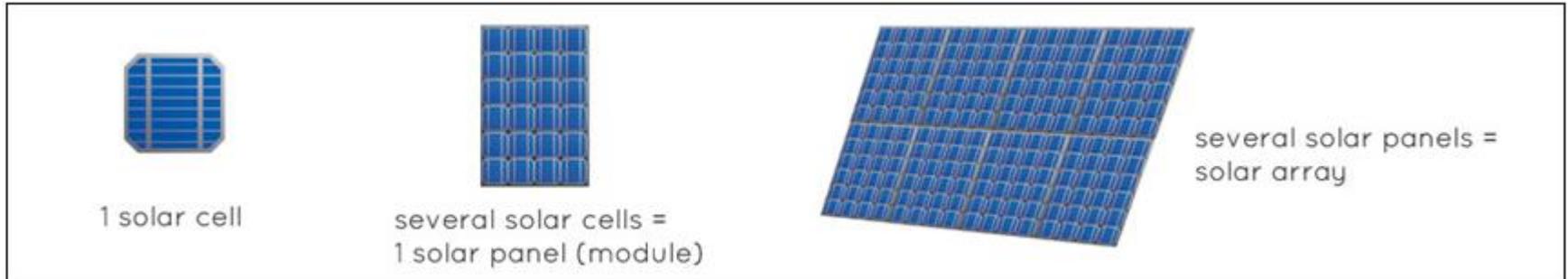
Este efecto consiste en la generación de energía eléctrica en un material semiconductor (medio) al incidir sobre él una radiación electromagnética. Este efecto fue descubierto por H. Hertz en 1884 y la primera celda fotoeléctrica fue construida por C. Fritts en 1884. [5]

Panel solar PV

Es un arreglo o conjunto de celdas fotoeléctricas que transforman la energía solar (lumínica) en electricidad. [5]

Arreglo de paneles solares PV

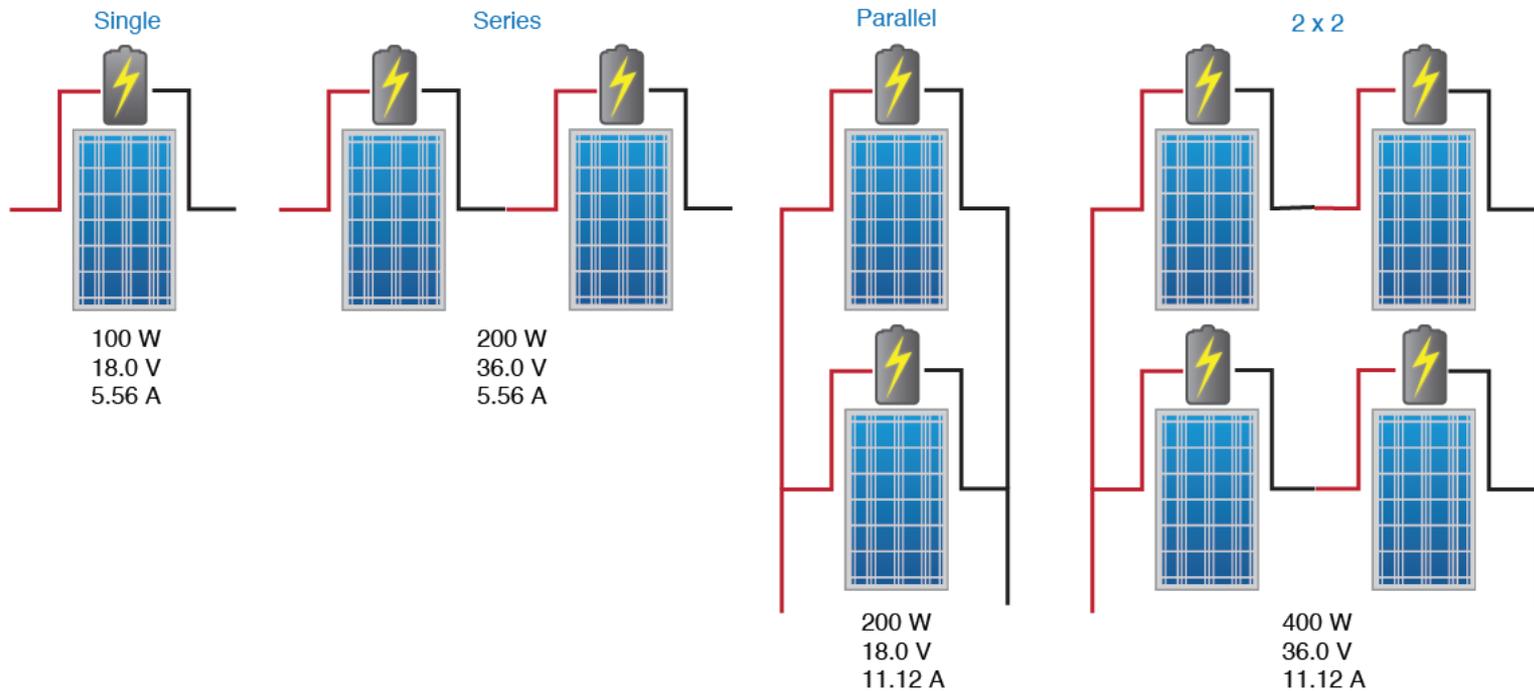
Es un conjunto de paneles solares PV que pueden estar conectados en serie o en paralelo. [5]



Marco teórico

Conexión de los paneles solares PV

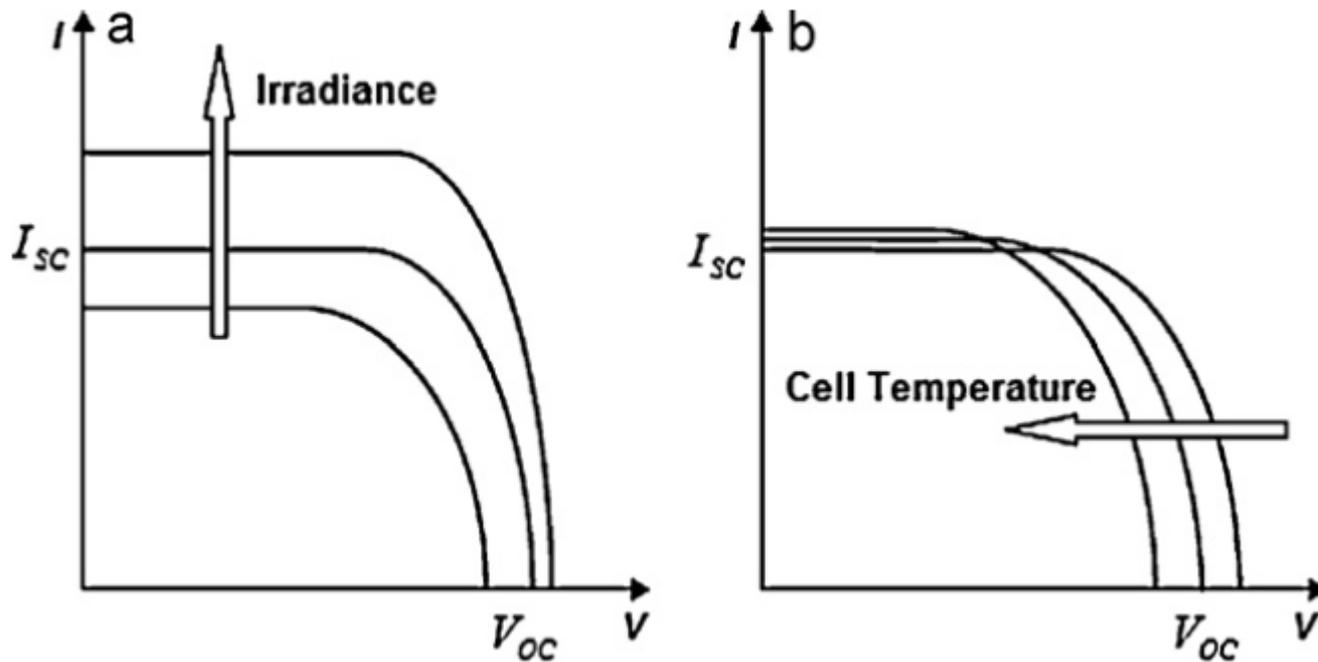
Los paneles solares se pueden conectar en serie y/o paralelo. [6]



Marco teórico

Curva I-V

La curva I-V describe el comportamiento de un panel solar específico en función de la radiación incidente y de la temperatura de las celdas. [6]



Tomado de [7]



Marco teórico

Factores ambientales

Los factores ambientales pueden afectar de dos formas la eficiencia de un arreglo de paneles solares PV: Aumentando la temperatura del panel o reduciendo la cantidad de radiación incidente. [8, 9, 10, 11]

Variación de la temperatura	Temperatura ambiente Velocidad y dirección de los vientos Precipitaciones Radiación solar
Variación de la radiación incidente	Radiación solar Humedad relativa Precipitaciones Nubosidad Polución Material particulado en el aire Flora y fauna

Planta de toma de datos



Inversor 2 del proyecto Autotropical Solar

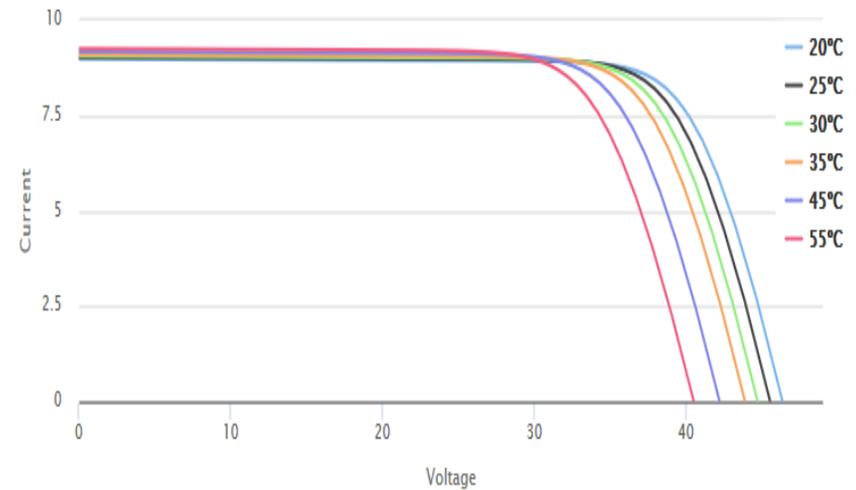
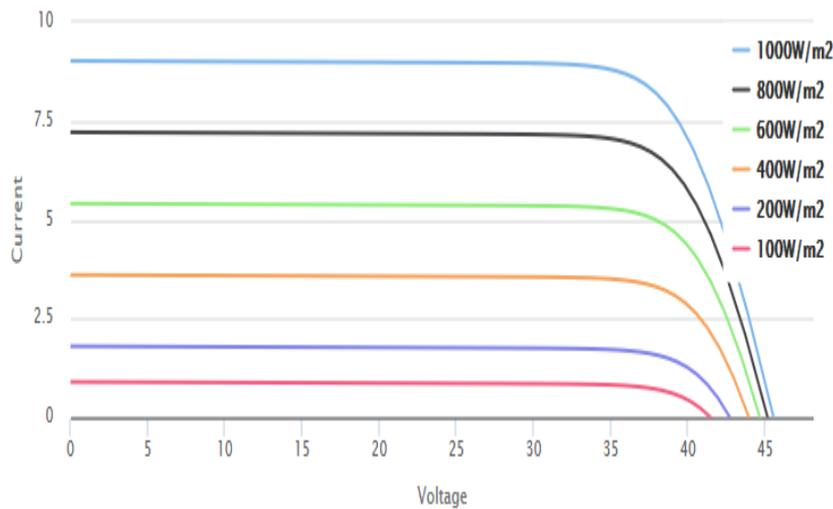
52 módulos solares PV de 315 Wp
2 String de 26 módulos (2 series de
13 módulos en paralelo)

Se tomaron datos desde el 15 de mayo de 2017
hasta el 22 de septiembre de 2017.



Modelos matemáticos

Comportamiento de los módulos PV



$$P = A \cdot G_{eff}^2 + B \cdot G_{eff} + C \cdot T_{cell}^2 + D \cdot T_{cell} + E \cdot G_{eff} \cdot T_{cell} + F \cdot G_{eff}^2 \cdot T_{cell} + G \cdot G_{eff} \cdot T_{cell}^2 + H$$

Modelos matemáticos

Cálculo de la temperatura de los módulos

$$\cos \theta = \cos(\phi - \beta) \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega + \sin(\phi - \beta) \cdot \sin \delta$$

$$\cos \theta_z = \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega + \sin \phi \sin \omega$$

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z}$$

θ : ángulo de incidencia de la radiación solar.

ϕ : latitud en grados de la ubicación del sistema.

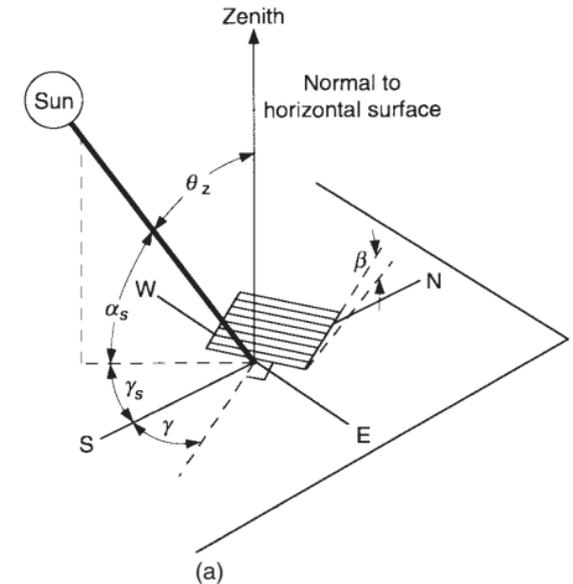
β : ángulo de inclinación del arreglo de paneles con respecto a la horizontal.

δ : declinación del sol.

ω : ángulo de la posición del sol.

θ_z : ángulo del zenith.

R_b : relación entre la radiación sobre la horizontal y una superficie inclinada.



Modelos matemáticos

Cálculo de la temperatura de los módulos

$$G_{eff} = R_b \cdot I$$

$$T_{cell} = T_{amb} + \frac{G_{eff}}{U_0 + U_1 W_s}$$

R_b : relación entre la radiación sobre la horizontal y una superficie inclinada.

I : radiación solar sobre la horizontal (W/m^2).

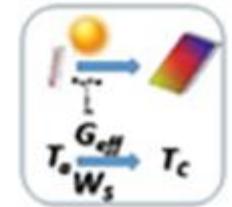
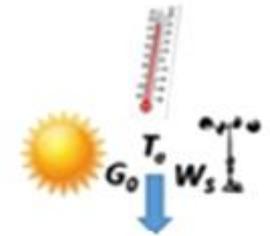
G_{eff} : radiación solar efectiva haciendo la corrección del ángulo de inclinación (W/m^2)

T_{amb} : temperatura ambiente ($^{\circ}C$)

U_0 : coeficiente de transferencia de calor por radiación (W/m^2-K).

U_1 : coeficiente de transferencia de calor por convección (Ws/m^3-K).

W_s : velocidad del viento (m/s).





Modelos matemáticos

Cálculo de la eficiencia de los módulos

$$\eta = \frac{P_{DC}}{G_{eff} \cdot A \cdot N}$$

η : eficiencia del sistema.

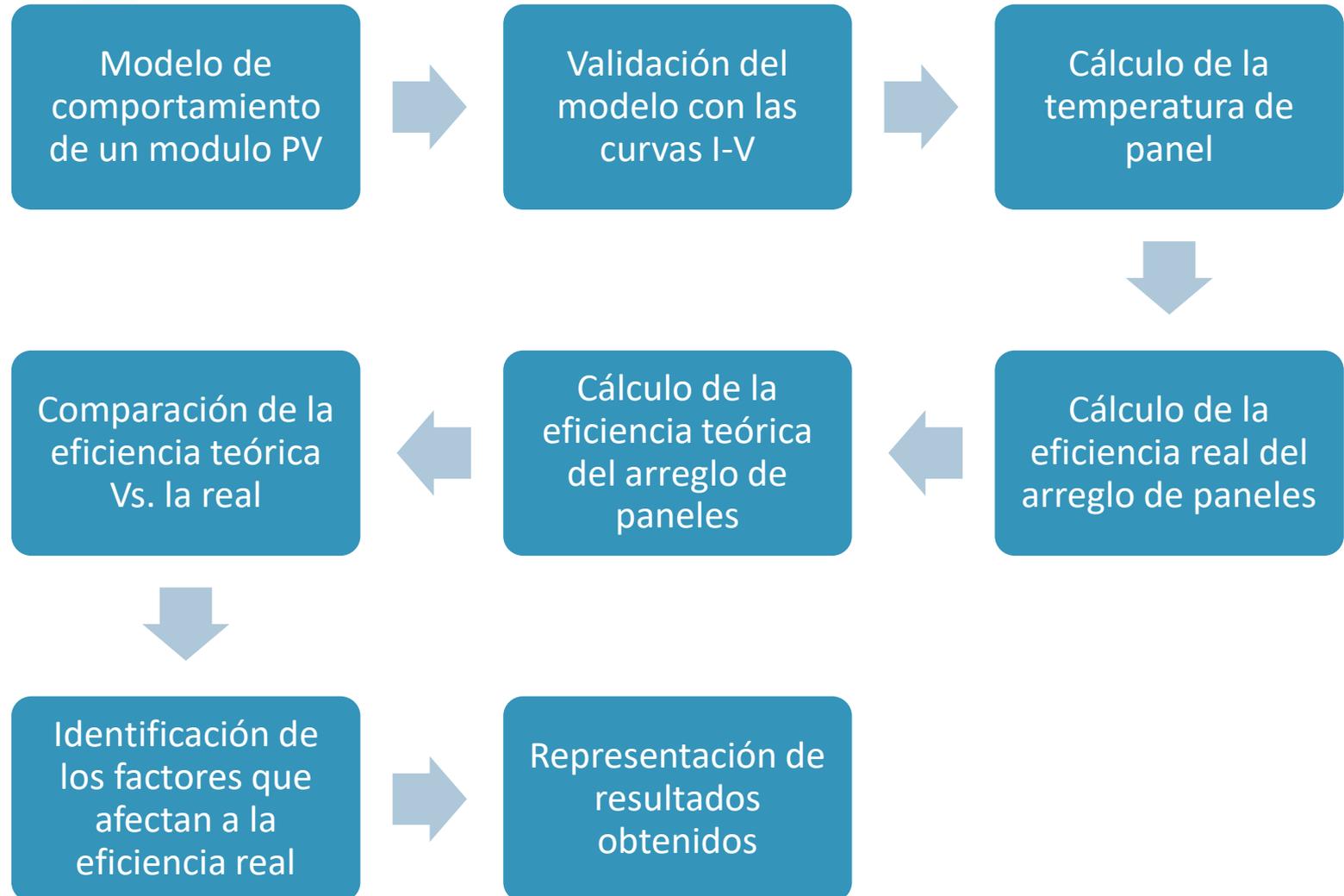
P_{DC} : Potencia DC generada (W).

G_{eff} : radiación solar efectiva haciendo la corrección del ángulo de inclinación (W/m²).

A : Área de un módulo (m²).

N : Cantidad de módulos.

Metodología



Datos experimentales

Variables medidas

Temperatura ambiente

Humedad relativa

Velocidad del viento

Radiación solar incidente

Precipitaciones diarias

Presión barométrica

Potencia DC generada

Variables calculadas

Radiación efectiva

Temperatura del modulo

Potencia DC generada teórica

Eficiencia del sistema

Datos de diseño

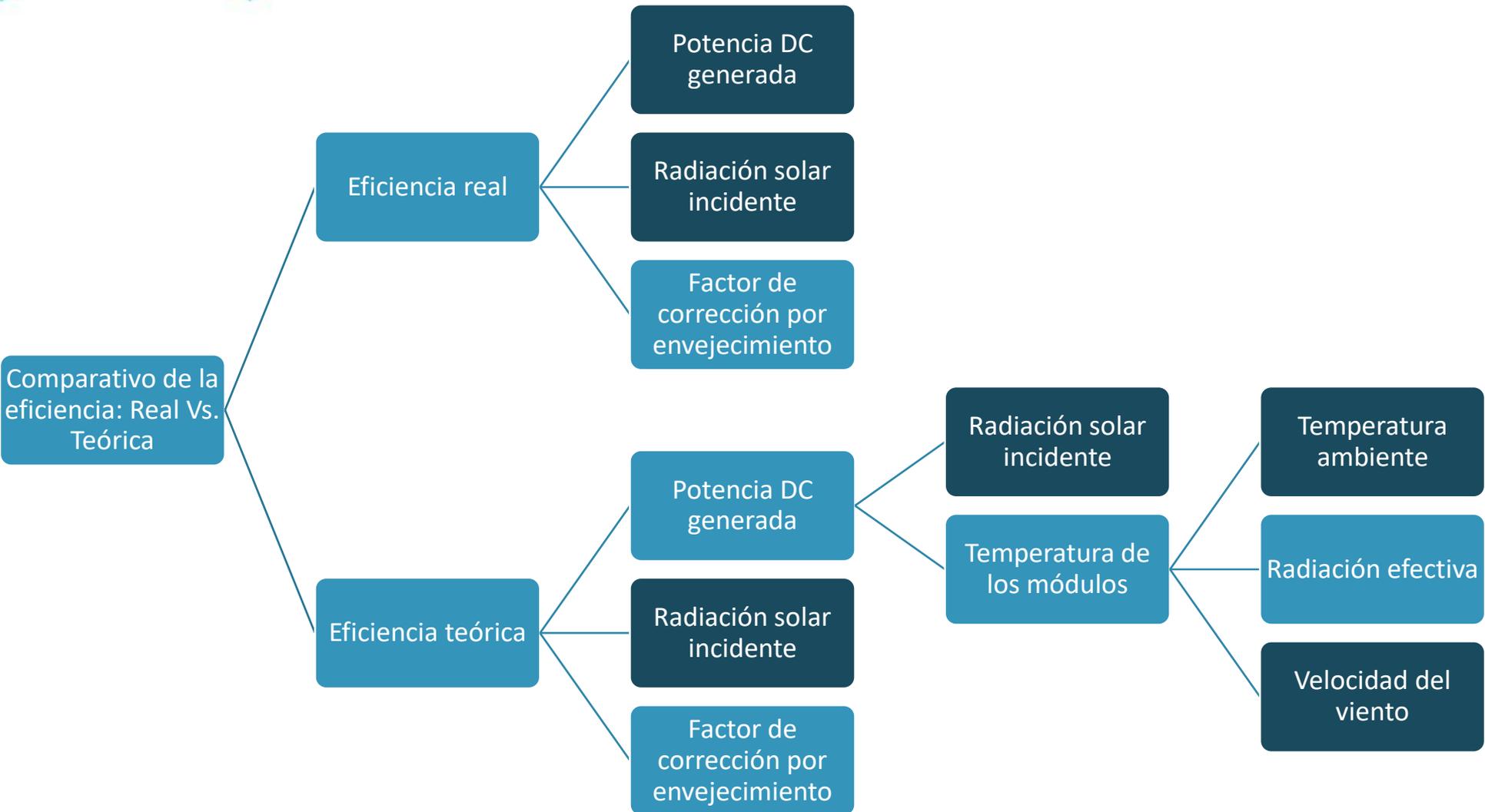
Curvas I-V de los módulos

Curva de envejecimiento de los módulos

Ubicación geográfica del sistema

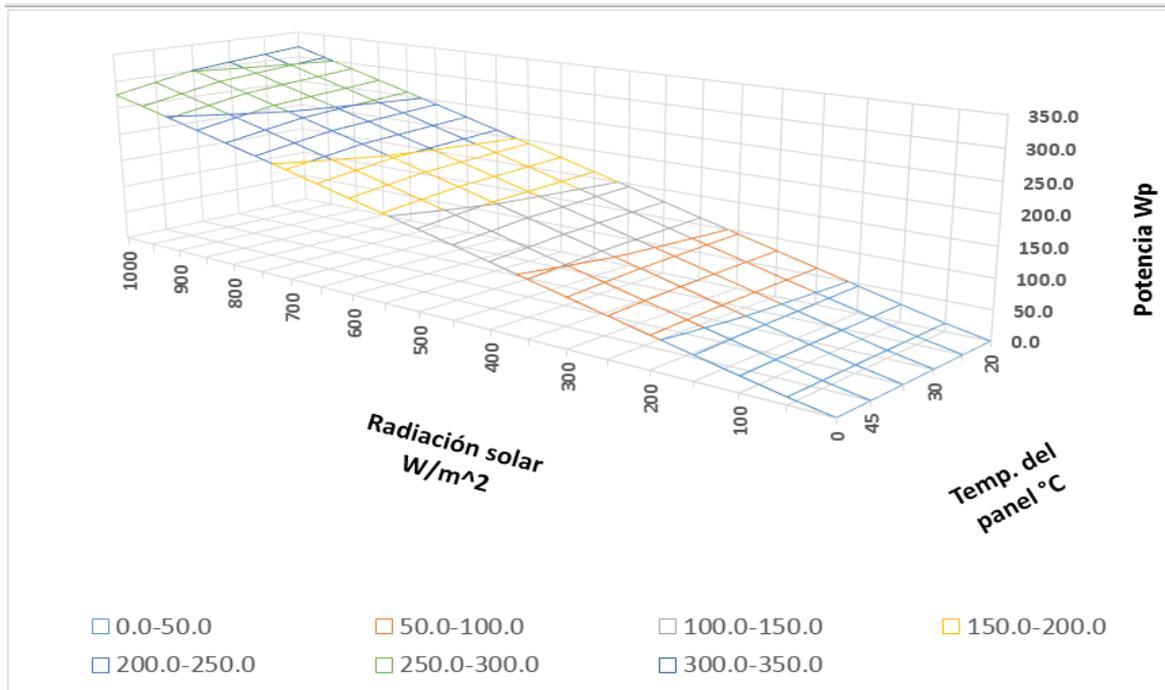
Ángulo de inclinación de los módulos

Datos experimentales



Resultados

Modelo de comportamiento de los módulos PV



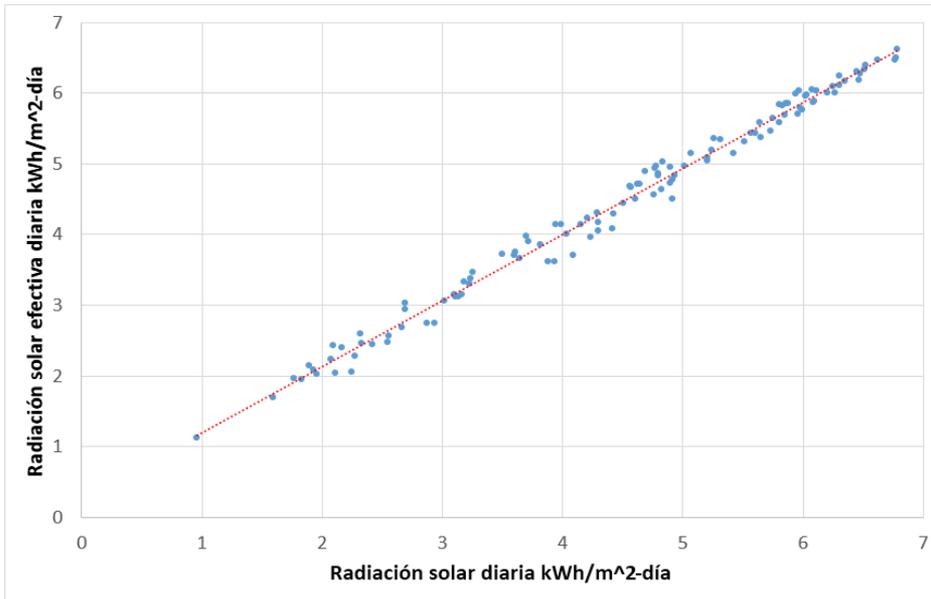
Correlación de 99.993%

P

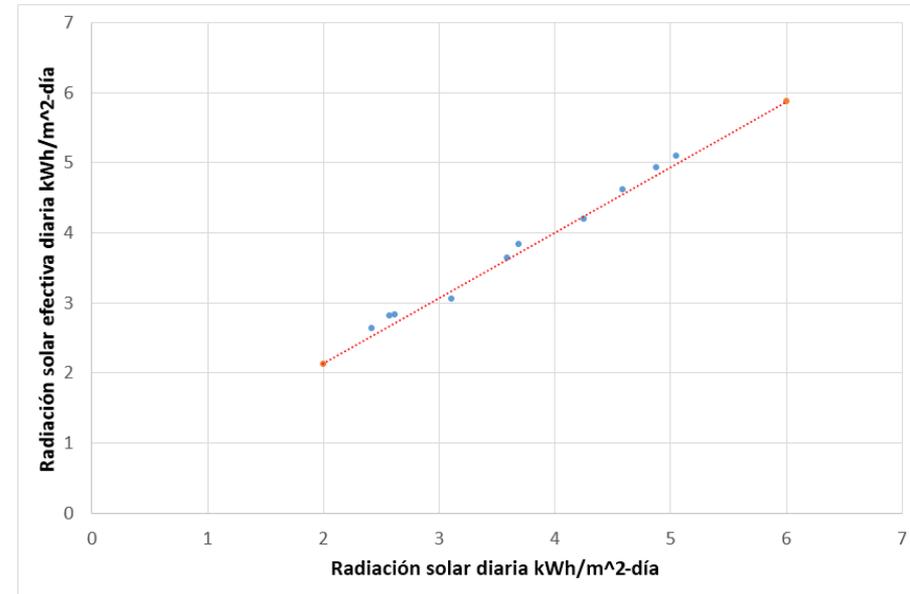
$$= (-7.45E - 6) \cdot G_{eff}^2 + (3.56E - 1) \cdot G_{eff} + (-5.31E - 5) \cdot T_{cell}^2 + (1.01E - 2) \cdot T_{cell} + (-1.19E - 3) \cdot G_{eff} \cdot T_{cell} + (5.90E - 9) \cdot G_{eff}^2 \cdot T_{cell} + (-1.74E - 7) \cdot G_{eff} \cdot T_{cell}^2 + 2.80$$

Resultados

Modelo de la radiación efectiva



Correlación de 98.98%



Correlación de 98.73%

$$G_{eff} = 0.9357 \cdot I + 0.2549$$

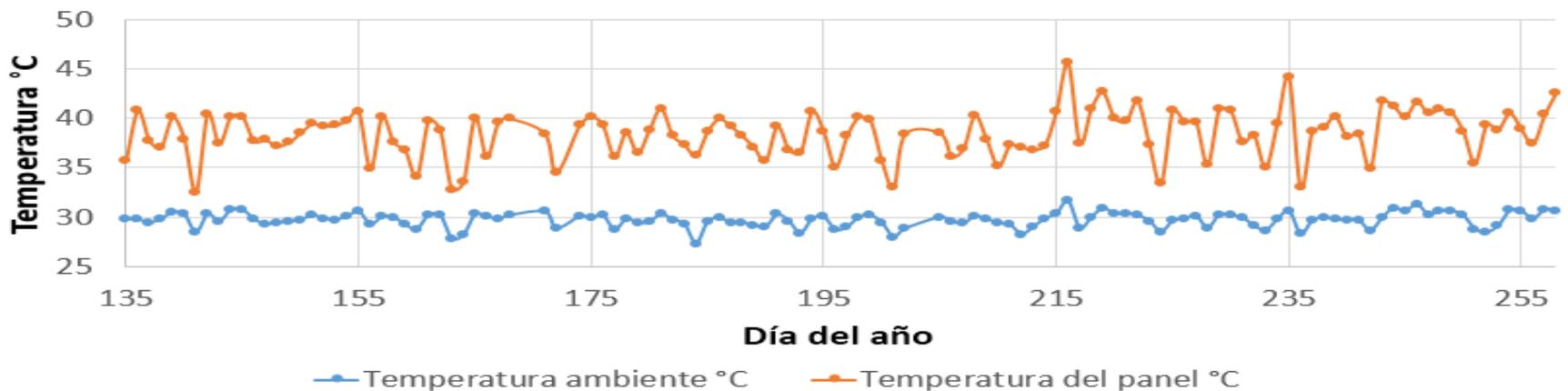
Resultados

Modelo de la temperatura de los módulos PV

$$T_{cell} = T_{amb} + \frac{G_{eff}}{U_0 + U_1 W_s}$$

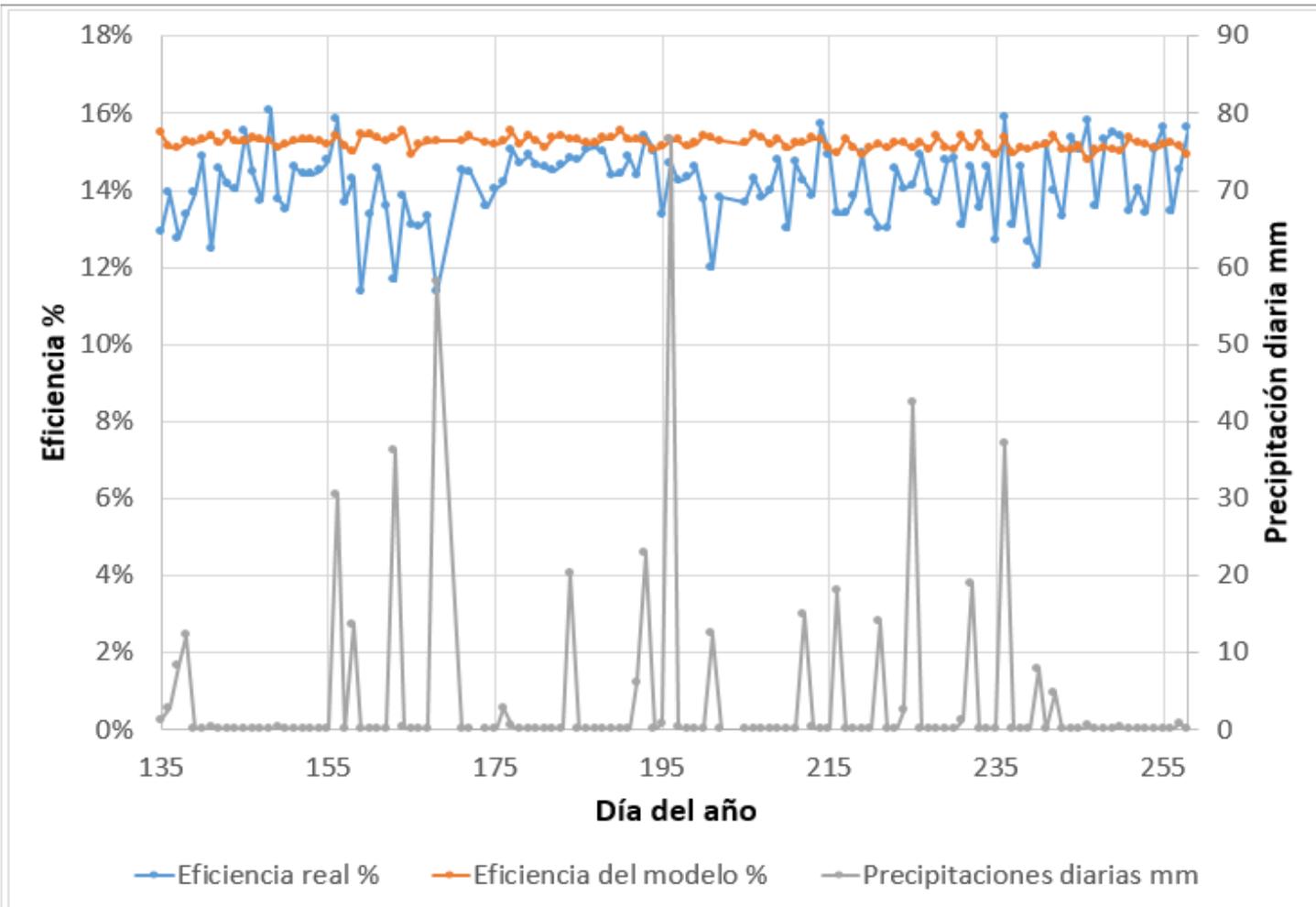
$$U_0 = 30.02 \text{ W/m}^2\text{-K}$$

$$U_1 = 6.28 \text{ W-s/m}^3\text{-K}$$



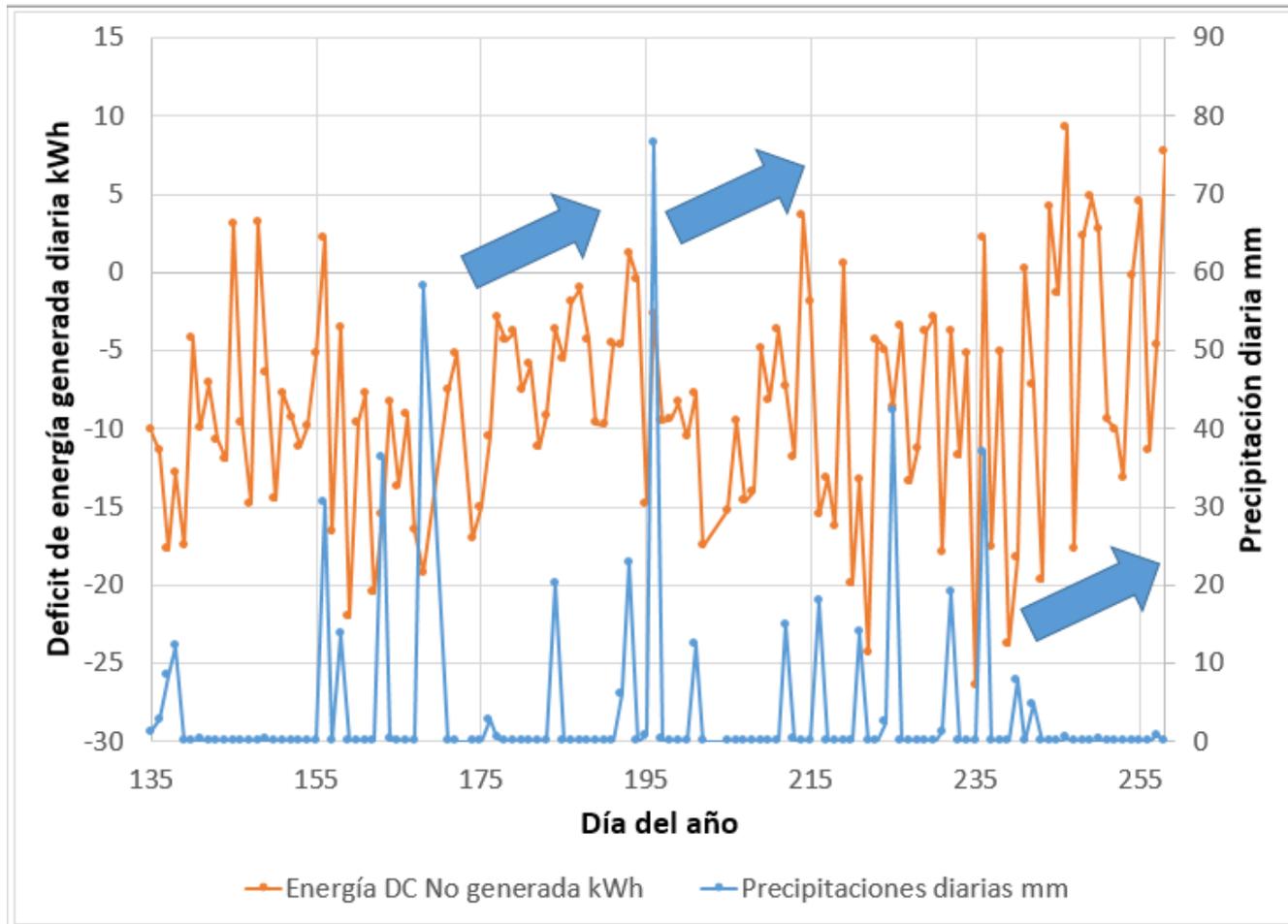
Resultados

Comparativo de la eficiencia: Real Vs. Teórica



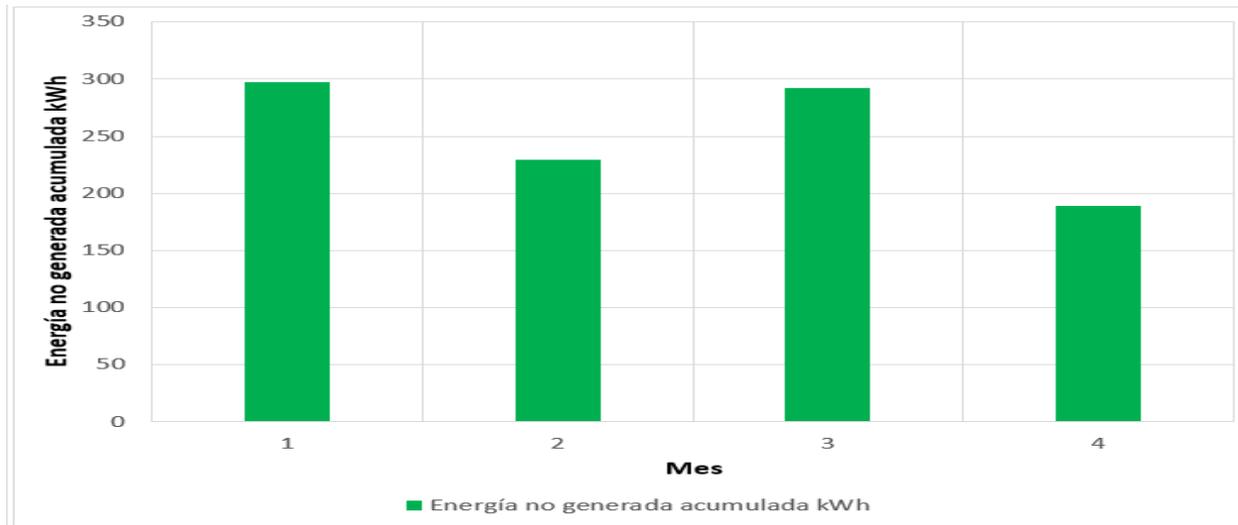
Resultados

Impacto de las precipitaciones sobre la energía no generada



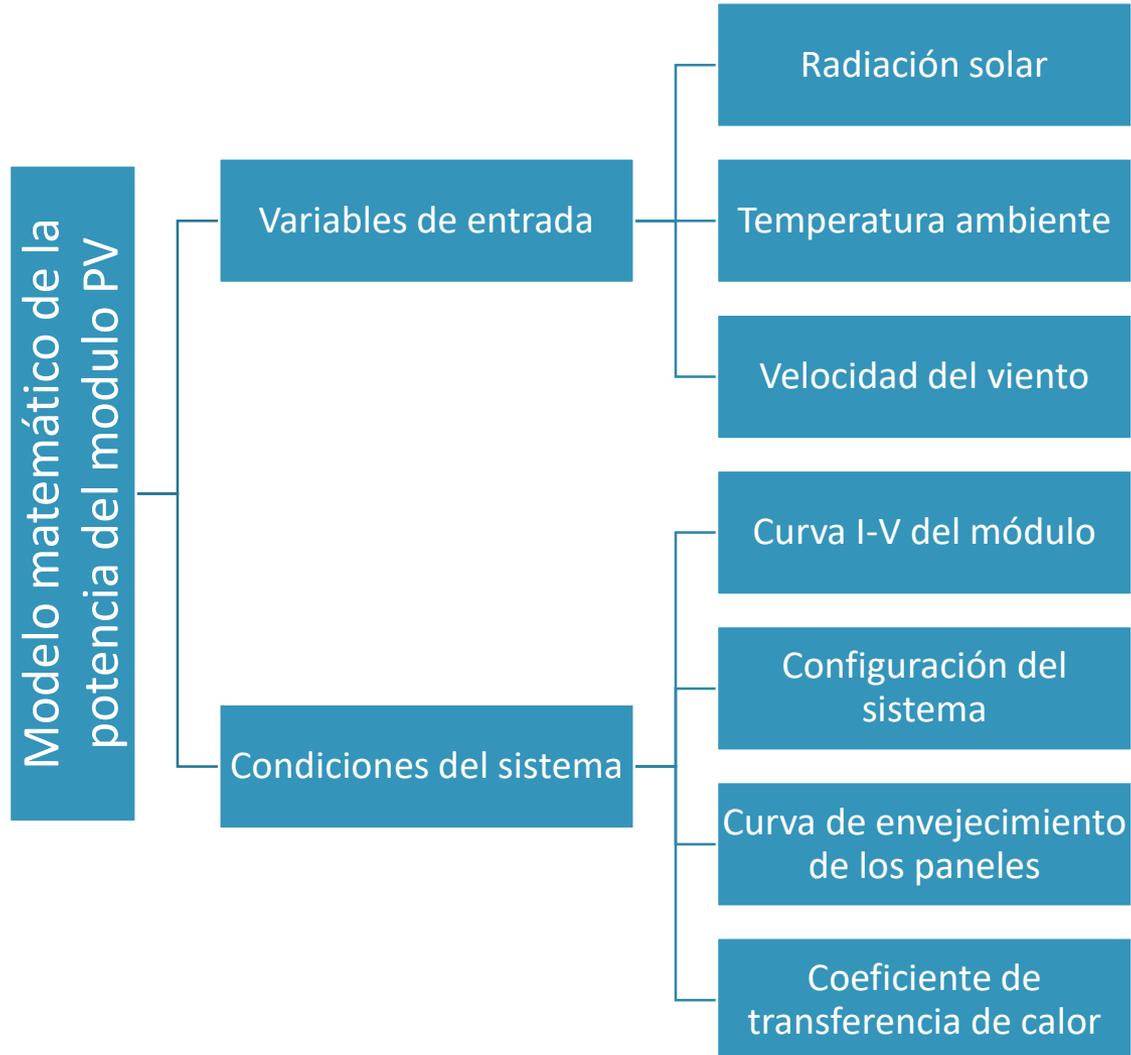
Resultados

Energía no generada mensual

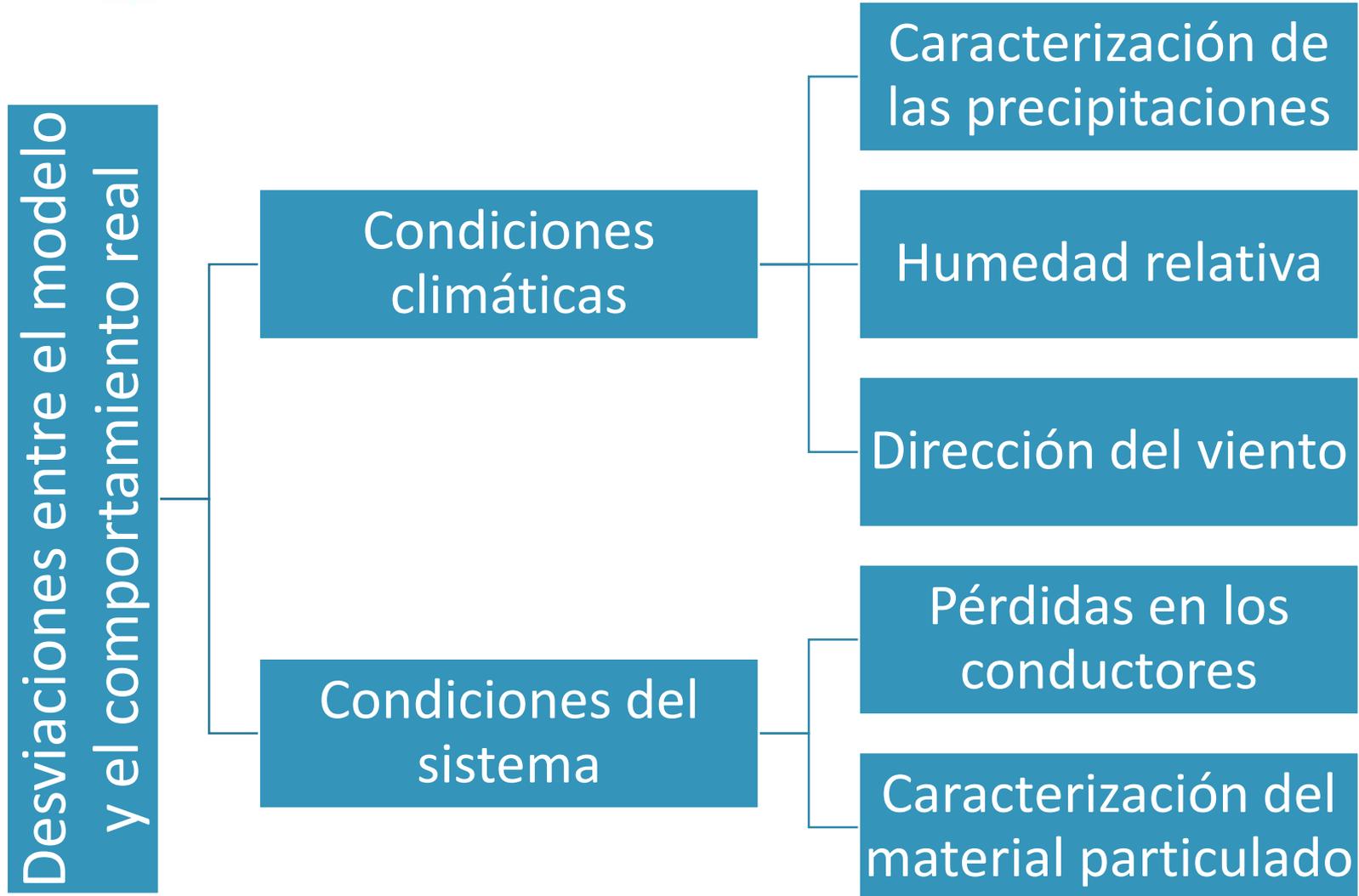


Mes	Energía no generada, kWh	Huella de carbono indirecta, kgCO ₂	Factor de emisión de CO ₂ del sistema PV, kgCO ₂ /kWp
1	297.15	62.40	1.90
2	229.70	48.24	1.47
3	292.19	61.36	1.87
4	189.34	39.76	1.21

Conclusiones



Conclusiones





Recomendaciones

- Modelar el comportamiento de las precipitaciones incluyendo factores como duración e intensidad para determinar su impacto sobre la eficiencia de los arreglos de módulos solares PV. [14]
- Calcular a través de un diseño experimental el valor de los coeficientes U_0 y U_1 para las condiciones específicas de Barranquilla.
- Establecer un procedimiento para determinar las frecuencias óptimas de limpieza de los arreglos de módulos solares PV teniendo como base parámetros de eficiencia y costos de limpieza.



Bibliografía

- [1] International Energy Agency. World Energy Outlook 2017. Internet: <https://www.iea.org/weo2017/>, Nov. 14, 2017 [Feb. 5, 2018].
- [2] International Energy Agency. Renewable energy continuing to increase market share. Internet: <https://www.iea.org/newsroom/news/2016/july/renewable-energy-continuing-to-increase-market-share.html>, Jul. 2016 [Feb. 5, 2018].
- [3] Unidad de Planeación Minero Energética. Mapas de radiación solar sobre una superficie plana. Internet: http://www.upme.gov.co/docs/atlas_radiacion_solar/2-mapas_radiacion_solar.pdf, Jul. 2014 [Feb. 5, 2018]
- [4] Folsom Labs. Component library modules. Internet: <https://www.helioscope.com/library/modules/38835/characterization/38864>, May. 29, 2015 [Feb. 5, 2018].
- [5] Dunlop, J. P. Photovoltaic Systems, 3rd ed., Orland Park, IL: American Technical Publisher, 2012.
- [6] Solmetric (2011). Guide to interpreting I-V curve measurements of PV arrays. Application Note PV A-600-1. Sebastopol, CA: Author.
- [7] Chikate, B. V., Sadawarte, Y. A. "The factors affecting the performance of solar cell" International Conference on Quality Up-gradation in Engineering. 2015.



Bibliografía

- [8] Ghazi, S., Ip, K. “The effect of weather conditions on the efficiency of PV panels in the southeast of UK” *Renewable Energy*, vol. 69, pp. 50-59, Mar. 2014.
- [9] Adinoyi, M. J., Said, S. A. M. “Effect of dust accumulation on the power outputs of solar photovoltaic modules” *Renewable Energy*, vol. 60, pp. 633-636, Jul. 2013.
- [10] NREL, Sandia, Sunspec Alliance SuNLaMP PV O&M Working Group. *Best Practice in Photovoltaic System Operation and Maintenance*, 2nd ed., Golden, CO: Author. 2013.
- [11] Schwingshackl C., Petitta M., Wagner J. E., Belluardo G., Moser D., Catelli, M., Zebisch, M., Tetzlaff, A. “Wind Effect on PV Module Temperature: Analysis of Different Techniques for an Accurate Estimation”. *Energy Procedia* vol. 40, pp. 77-86, 2013.
- [12] Duffie, J. A., Beckman, W. A. *Solar Engineering of Thermal Processes* 4th ed., Hoboken, NJ: Wiley, 2013.
- [13] Almeida, M. P., Muñoz, M., de la Parra, I., Perpiñán, O. “Comparative study of PV power forecast using parametric and nonparametric PV models” *Solar Energy* vol. 55, pp. 854-866, May. 2017.
- [14] Mejía, F., Kleissl, J., Bosch, J. L. The effect of dust on solar photovoltaic systems. *Energy Procedia* vol. 49, pp. 2370-2376. 2013.



Gracias por su atención.