

PROCEDIMIENTO DEL CÁLCULO DE LA POTENCIA NOMINAL DE UN GENERADOR FOTOVOLTAICO

PROCEDURE FOR CALCULATING THE NOMINAL POWER OF A PHOTOVOLTAIC GENERATOR

**Brando Calsi-Silva¹ , José Angulo-Abanto¹ , Luis Conde-Mendoza¹ ,
Emilio Muñoz-Cerón² , Rolf Grieseler¹ , Jorge Guerra-Torres¹ ,
Juan de la Casa-Higueras² , Jan Palomino-Töfflinger^{1*} **

¹Departamento de Ciencias, Sección de Física, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú

²Grupo IDEA, Departamento de Electrónica, Universidad de Jaén, Jaén, España

Recibido (Received): 06/02/2020 Aceptado (Accepted): 05/03/2020

RESUMEN

La potencia nominal de un sistema fotovoltaico es un parámetro útil en la determinación de la condición en el que se encuentra el generador fotovoltaico. En el presente trabajo se siguió el procedimiento planteado por Martínez-Moreno, el cual se apoya en el modelo de Osterwald. Durante el desarrollo del procedimiento se observó el efecto de histéresis en diferente medida a lo largo de la campaña experimental. Los valores de la potencia corregida versus irradiancia diferían a lo largo del día, incluso cuando los valores de irradiancia y temperatura del módulo son similares. Lo que conllevaba a una incertidumbre en la inclusión de todos los datos. Debido a esto, se busca la adición de un filtro de los datos en el procedimiento de la estimación de la potencia nominal como complemento a lo propuesto por Martínez-Moreno en un intento de esclarecer el cálculo en generadores que presenten este comportamiento no lineal.

Palabras Clave: potencia nominal, energía solar y caracterización fotovoltaica, sistemas fotovoltaicos

ABSTRACT

The nominal power of a photovoltaic system is a useful parameter in the determination of the current state of a photovoltaic generator. In the present work, the procedure proposed by Martínez-Moreno was followed, which is based on the Osterwald model. During the application of the procedure, a hysteresis effect was observed to a different extent throughout the experimental campaign. The corrected power versus irradiance values differed during the day, even when the irradiance and temperature of the module were similar. This led to an uncertainty in the inclusion of all the data. Therefore, the addition of a filter of the data is sought in the procedure of the estimation of the nominal power, as a complement to that proposed by Martínez-Moreno in an attempt to clarify the calculation in generators that presents this non-linear behavior.

Keywords: nominal power, solar energy and photovoltaic characterization, photovoltaic systems

* Corresponding author.:
E-mail: japalominot@pucp.edu.pe

1. INTRODUCCIÓN

Existen en el mercado una variedad de paneles fotovoltaicos (FV) medidos en condiciones de laboratorio y no a sol real, donde aparecen pérdidas por factores externos e internos del generador [1]. Para un sistema FV, la potencia nominal (P_M^*) se distingue de su valor según la ficha técnica debido a diferentes tipos de pérdidas, como discordancia entre paneles, resistencia de cables, puntos calientes, degradación, suciedad, humedad, fenómenos climatológicos particulares de la zona, entre otros [2]–[5]. Esta representa la potencia máxima de salida de la celda/ del módulo FV bajo condiciones estándares de medida, CEM (irradiancia de 1000 W/m^2 , temperatura de la celda de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ y espectro AM 1,5). Debido a esto, el aseguramiento al consumidor del comportamiento esperado por el equipo es relevante. En este sentido, es importante estimar los principales parámetros de un sistema FV en condiciones reales de operación, de modo que se tenga la certeza de su correcto funcionamiento. Dentro de los parámetros entregados por el fabricante, el presente estudio se centra en la potencia nominal (P_M^*), ya que está asociada con la garantía provista por el fabricante.

Para calcular la P_M^* con datos colectados bajo condiciones reales de medida, diferentes enfoques basados en la ecuación de Osterwald han sido evaluados [6]. Sin embargo, durante el estudio se observó un comportamiento extraño, no lineal, de la potencia en corriente continua (P_{DC}) versus la irradiancia (G) a lo largo del día. Se observan valores distantes en la potencia de salida para un mismo valor de G , antes y después del mediodía. A este comportamiento de la potencia se le etiqueta como histéresis [7]. En el presente trabajo se propone un paso intermedio en el procedimiento implementado por Martínez-Moreno [8], a modo de determinar con mayor precisión la P_M^* en generadores que exhiban este comportamiento no lineal.

2. METODOLOGÍA

Se realizó el estudio de la planta La Calerilla, esta se encuentra ubicada al sur de España, en la provincia de Granada y situada en las coordenadas UTM: x: 495.134; y: 4.127.026; huso horario: 30. Esta planta cuenta con una irradiancia global horizontal anual de 1880 kWh/m^2 y temperatura promedio de $13,3 \text{ }^\circ\text{C}$, lo cual es ventajoso

en la producción de energía eléctrica ya que se cuenta con altos niveles de radiación y temperatura media moderada [9]. La planta consiste en 32 ramas, 18 módulos policristalinos (*pc-Si*) en serie por rama. Además, se cuenta con una potencia nominal de $109,44 \text{ kW}$ de parte de la hoja del fabricante, pero con una potencia nominal de 100 kW del inversor.

La campaña de estudio se realizó desde finales de marzo hasta septiembre del 2018, obviando los días donde hubo problemas o mantenimiento de la planta quedando con 163 días para su posterior análisis. Para el estudio de la temperatura y la irradiancia efectiva incidente se usaron dos módulos FV calibrados de idénticas características y del mismo año de fabricación a los usados en la planta. La medida de la tensión en corriente continua se realizó en la entrada del inversor, usando un sensor industrial programable del fabricante CIRCUTOR, modelo DH96-CPM. Para la corriente continua se usó una resistencia shunt $500\text{A} - 150 \text{ mV}$ (clase 0,5). La potencia en corriente continua se monitorizó como el producto instantáneo de la corriente y tensión. Igualmente, se monitorizó la potencia en corriente alterna (P_{AC}) con un vatímetro de alta gama, marca Yokogawa, modelo WT1600S. En la colección de datos, junto con los parámetros ambientales se utilizó un sistema de adquisición de datos comercial Graphtec (modelo midí LOGGER GL220), el cual guardaba los datos cada 30 segundos para el periodo de estudio.

Se categorizaron los días en el periodo de estudio a manera de seleccionar solo los días soleados dentro de la campaña experimental. Las categorías usadas fueron: soleado, nublado parcial, baja irradiancia y días con poca data. Para evitar efecto de sombra sobre el panel calibrado se analizó la potencia en corriente continua (P_{DC}) durante el día. En primer lugar, se tomó en cuenta el filtro de cantidad de data para evitar días con problemas de recolección de datos. Segundo, una mínima cantidad de datos pasado irradiancia de 800 W/m^2 a modo de tener suficientes mediciones en un día para analizar. Por último, mediante un ajuste senoidal de la P_{DC} se separaron los días restantes (fig. (1)). Se determinó que se contaba con 27 días soleados, 115 nublados, 7 de baja irradiancia y 4 con data incompleta. Para el presente estudio se utilizaron solamente los días soleados, siguiendo el procedimiento de Martínez-Moreno [8].

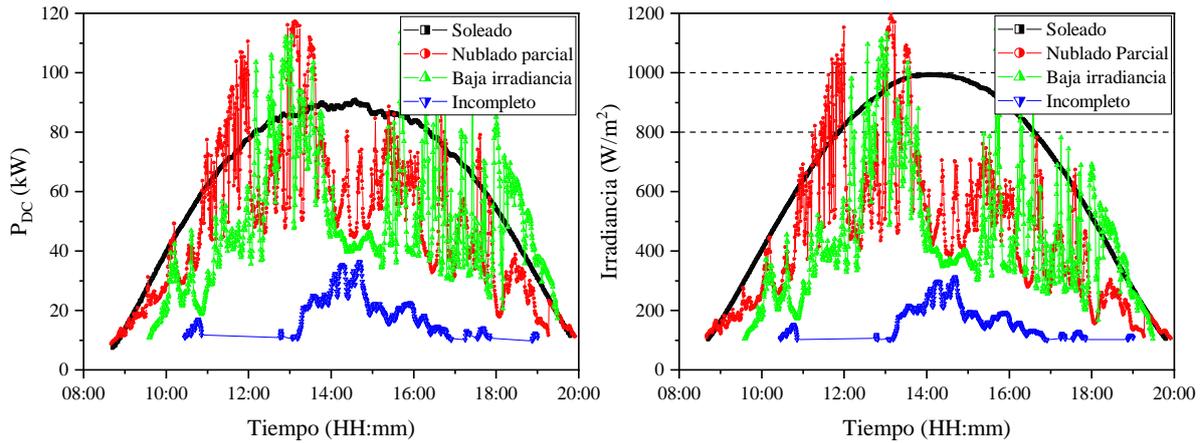


Fig. 1. Comparación de irradiancia y potencia para diferentes categorías. (a) Clasificación de 4 días dentro de la campaña experimental y (b) visualización del filtro de irradiancia para el cálculo de la potencia corregida ($P_{(25)}$).

21.06.2018 Datos con Ajustes lineales

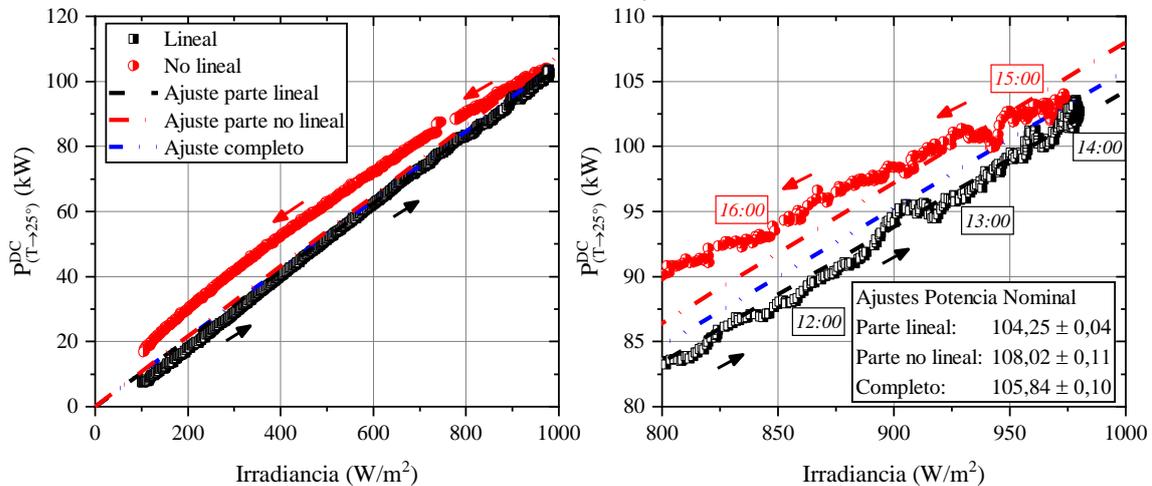


Fig. 2. Datos de la potencia corregida versus la irradiancia, proceso de filtrado de la data y ajuste lineal para diferentes conjuntos de datos del 21 de junio del 2018.

Se implementó como primer paso el uso de la ecuación de Osterwald para la estimación de la potencia nominal (P_M^*) Ec. (1).

$$P_{DC} = P_M^*[1 + \gamma(T_M - T^*)] \frac{G}{G^*} \quad (1)$$

Donde P_{DC} es la potencia en corriente continua, P_M^* es la potencia nominal del sistema a STC, $\gamma = 0,43\%/^{\circ}C$ es el factor de corrección de la temperatura según la ficha técnica, T_M la temperatura del sistema, G es la irradiancia, T^* y G^* son la temperatura e irradiancia en STC. De esta ecuación se puede resaltar que la P_M^* debería ser constante en el tiempo pues representa un valor característico del sistema. Sin embargo, existen factores que el modelo no considera; como las pérdidas por degradación, efecto del polvo, sombras, etc. También, se han observado discrepancias con el modelo cuando se estudian sistemas con seguidores solares de 1 o 2 ejes [7].

A modo de linealizar la ecuación de Osterwald se corrigió la potencia en corriente continua (P_{DC}) a 25 °C de temperatura ($P_{T \rightarrow 25}^{DC}$) Ec. (2).

$$P_{T \rightarrow 25}^{DC} = \frac{P_{DC}}{1 + \gamma(T_M - 25)} \quad (2)$$

Continuando con el procedimiento, se filtró los datos dentro del rango de irradiancia (entre 800 y 1000 W/m^2) tal que se evita el comportamiento no lineal de $P_{T \rightarrow 25}^{DC}$ a bajas irradiancias. Sin embargo, al realizar este proceso en la presente estación se observó una diferencia entre la $P_{T \rightarrow 25}^{DC}$ antes y después del punto máximo de potencia corregida (fig. 2). En estas circunstancias, se consideró relevante esclarecer el método de filtrado de la data para su correcto ajuste y estimación de la potencia nominal del sistema.

Para la estimación de la P_M^* se ajustó los datos de $P_{T \rightarrow 25}^{DC}$, con la igualdad de la linealización de la ecuación de Osterwald Ec. (3). En este proceso, se realizó esta

estimación para los diferentes conjuntos de datos. Lineal representa el conjunto de datos hasta el punto máximo de la potencia corregida, no lineal después de punto de máximo y completo representa el método usado en su trabajo, sin hacer la distinción entre la parte lineal y no lineal de $P_{T \rightarrow 25}^{DC}$ (fig. 2).

$$P_{T \rightarrow 25}^{DC} = P_M^* \frac{G}{G^*} \quad (3)$$

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Luego de la separación de los datos del día en dos partes (antes y después del punto máximo) se realiza la corrección de la potencia a 25°C de temperatura ($P_{T \rightarrow 25}^{DC}$). De este modo poder tener una relación con la irradiancia y estimar la potencia nominal del sistema con los diferentes conjuntos de datos, lineal, no lineal y completo (fig. 2). Con esto, podemos verificar el estado de la planta o sistema fotovoltaico (FV). Se utilizó la potencia nominal (P_M^*) de manera de corroborar el correcto funcionamiento del generador FV.

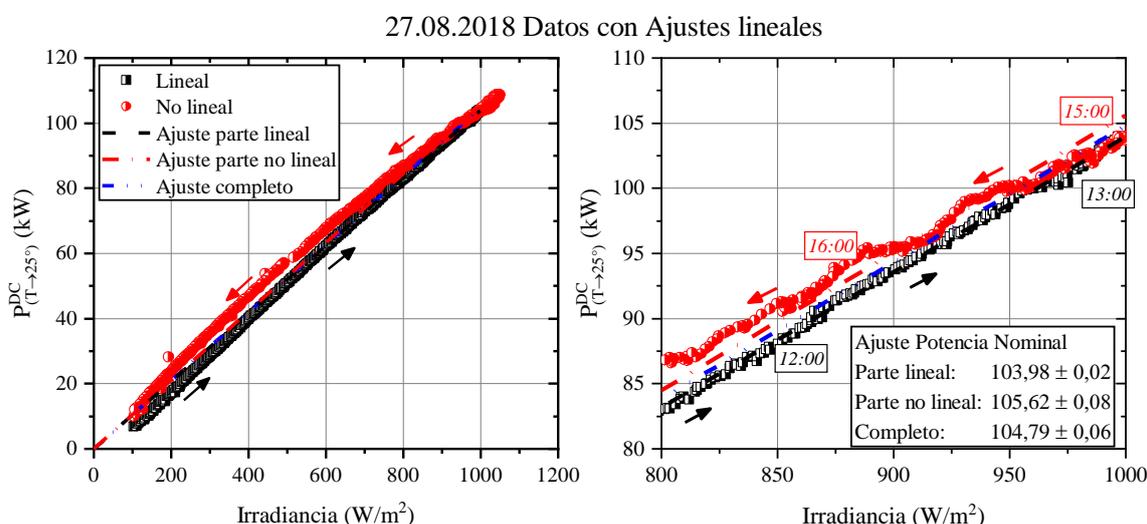


Fig. 1. Corroboración del comportamiento de la potencia corregida para un día donde no se observó gran diferencia entre la parte lineal y no lineal.

En el proceso de analizar si este comportamiento se observaba durante todo el periodo de estudio se realizó la estimación de la P_M^* con los tres conjuntos de datos, lineal, no lineal y completo (fig. 4). Durante esta corroboración se encontró un día, 27 de agosto del 2018, donde la P_M^* estimada no difiere en gran medida entre los conjuntos de datos propuestos (fig. 3). Durante la examinación de este día en particular, se corroboró la presencia del efecto de histéresis, pero en diferente medida que los otros días ya que este efecto más pronunciado en bajas irradiancias.

Se observó que la histéresis presente en la potencia corregida ($P_{T \rightarrow 25}^{DC}$) resultaba en una sobreestimación de la potencia nominal. Para la estimación de la P_M^* se debería considerar solo la parte lineal ya que esta concuerda con el modelo planteado por Osterwald (fig. 2). En caso de considerar los datos no lineales de

la $P_{T \rightarrow 25}^{DC}$ se estaría realizando una incorrecta estimación ya que la pendiente no estaría acorde con el comportamiento de los datos, a este efecto se le etiqueta como histéresis [7] (fig. 4). Este efecto se puede observar en diferente medida, durante la campaña experimental. Por lo que resulta relevante para la correcta estimación de la potencia nominal el proceso de filtrado de la potencia corregida ($P_{T \rightarrow 25}^{DC}$) para irradiancias altas si se observa el efecto de la histéresis en el generador FV en estudio.

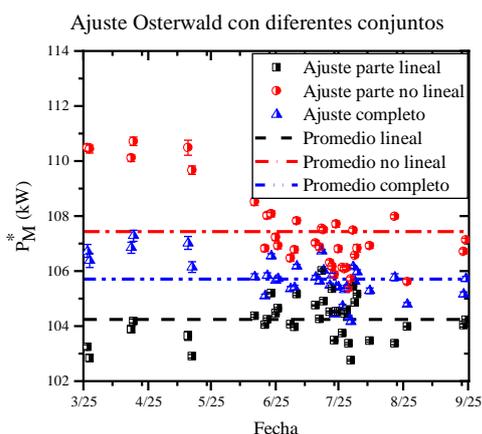


Fig. 2. Estimación de la potencia nominal durante la campaña experimental con los 3 conjuntos de datos; ascendente, descendente y completo.

Se obtuvo un valor promedio de 105,71 kW para el método presentado del conjunto completo de la data. Si consideramos solo la parte lineal de los datos se tiene un valor de 104,24 kW y 107,43 kW para la parte no lineal (ver TABLA I). Dentro de los valores calculados, se observa que la parte no lineal tiene el mayor promedio. Cabe resaltar que el promedio de la parte lineal tiene la menor desviación estándar, lo que corrobora que este conjunto de datos va más acorde con el modelo de Martínez. El efecto de la histéresis aún se encuentra en discusión y es un tema de interés para futuros estudios de sistemas FV.

TABLA I
Promedio y desviación estándar de las estimaciones diarias de la potencia nominal (P_M^*)

Conjunto de datos	Promedio (kW)	Desviación estándar	Error (%)
Lineal	104,24	0,05	4,71
No lineal	107,43	0,11	1,84
Completo	105,71	0,11	3,41

Nota: Se estimó la potencia nominal del módulo con los datos de todo el día, la agrupación con tendencia lineal, no lineal y la estimación del error respecto a la ficha técnica del módulo.

CONCLUSIONES

- Debe considerarse el filtrado de los datos que no concuerdan con el comportamiento lineal planteado por el modelo de Osterwald para una correcta estimación de la potencia nominal en el sistema FV en estudio.

- El efecto de histéresis dentro de la planta La Calerilla aún está en investigación. Es de interés la existencia del efecto de histéresis y verificar si su comportamiento es semejante en plantas basadas en sistemas FV.
- La recolección de otros parámetros ambientales (espectro solar, curva corriente-voltaje, polvo, dirección del viento, precipitación, etc.) ayudaría en el entendimiento del efecto de histéresis.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo recibió apoyo financiero por el Fondo Nacional de Desarrollo Científico, Tecnológico y de Innovación Tecnológica (FONDECYT) mediante el proyecto con el contrato N° 124-2018-FONDECYT.

REFERENCIAS

- [1] M. M. Fouad, L. A. Shihata, and E. S. I. Morgan, "An integrated review of factors influencing the performance of photovoltaic panels," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 80, no. July 2016, pp. 1499–1511, 2017.
- [2] F. M. Zaihidee, S. Mekhilef, M. Seyedmahmoudian, and B. Horan, "Dust as an unalterable deteriorative factor affecting PV panel's efficiency: Why and how," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 65, pp. 1267–1278, 2016.
- [3] R. García, M. Torres-Ramírez, E. Muñoz-Cerón, J. de la Casa, and J. Aguilera, "Spectral characterization of the solar resource of a sunny inland site for flat plate and concentrating PV systems," *Renew. Energy*, vol. 101, pp. 1169–1179, 2017.
- [4] M. Mussard and M. Amara, "Performance of solar photovoltaic modules under arid climatic conditions: A review," *Sol. Energy*, vol. 174, no. July, pp. 409–421, 2018.
- [5] M. M. D. Afonso, P. C. M. Carvalho, F. L. M. Antunes, and J. J. Hiluy Filho, "Deterioration and performance evaluation of photovoltaic modules in a semi-arid climate," *Renew. Energy Power Qual. J.*, no. March, pp. 424–428, 2017.
- [6] O. C. R., "Translation of device performance measurements to reference conditions," *Sol. Cells*, vol. 18, no. 3, pp. 269–279, 1986.
- [7] U. B. Filik, T. Filik, and O. N. Gerek, "A hysteresis model for fixed and sun tracking solar PV power generation systems," *Energies*, vol. 11, no. 3, 2018.
- [8] M. R. Martínez-Moreno F., Lorenzo E., Muñoz J., "On the testing of large PV arrays," *Prog. Photovolt Res. Appl.*, vol. 20, no. March 2011, pp. 11–33, 2012.
- [9] T. Huld, R. Müller, and A. Gambardella, "A new solar radiation database for estimating PV performance in Europe and Africa," *Sol. Energy*, vol. 86, no. 6, pp. 1803–1815, 2012.



Los artículos publicados por TECNIA pueden ser compartidos a través de la licencia Creative Commons: CC BY 4.0. Permisos lejos de este alcance pueden ser consultados a través del correo revistas@uni.edu.pe